

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**Lİ-İON BATARYA PAKETLERİ İÇİN AKILLI ADAPTRONİK TERMAL
YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mohammad JOULA

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

ŞUBAT 2022

**T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**Lİ-İON BATARYA PAKETLERİ İÇİN AKILLI ADAPTRONİK TERMAL
YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mohammad JOULA
(191203003)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Savaş DİLİBAL

ŞUBAT 2022



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Yüksek Lisans Tez Onay Belgesi

Enstitümüz Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı 191203003 numaralı öğrencisi Mohammad JOULA'nın "Li-ion Batarya Paketleri İçin Akıllı Adaptronik Termal Yönetim Sistemi Tasarımı" adlı tez çalışması, 04.02.2022 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aşağıdaki jüri tarafından *Oy Birliği* ile yüksek lisans tezi olarak *Kabul* edilmiştir.

Öğretim Üyesi Adı Soyadı

- 1) Tez Danışmanı:** Doç. Dr. Savaş DİLİBAL
- 2) Jüri Üyesi:** Prof. Dr. Sezgin ERSOY
- 3) Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Aytaç Uğur YERDEN

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Li-ion Batarya Paketleri İçin Akıllı Adaptronik Termal Yönetim Sistemi Tasarımı” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya ’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim. (04/02/2022)

Mohammad JOULA



Anne, Baba ve Eşime...



ÖNSÖZ

Beni çalışmanın konusuna yönlendiren ve süreç içerisinde yardımlarını esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Savaş DİLİBAL hocama ve sonsuz anlayışı ve maddi-manevi hiçbir desteği benden esirgemeyen aileme, en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca Birikim Pilleri Ltd. Şti. firma yöneticileri ve Birikim Pilleri ARGE departmanı (BARGEM) ekibine, tezimin ilerlemesinde verdikleri destek ve yaptıkları iş birliğinden dolayı teşekkür ederim.

Şubat 2022

Mohammad JOULA
Mekatronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Konusu	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
2.1 Kurşun Asit Bataryalar (Pb).....	5
2.2 Nikel Tabanlı Bataryalar (Ni-Cd / Ni-MH)	6
2.3 Lityum İyon Bataryalar (Li-ion)	7
2.3.1 Li-ion bataryaların çeşitleri	7
2.3.2 Li-ion bataryaların enerji kapasitesi.....	8
2.3.3 Li-ion bataryaların hücre gerilimleri ve şarj/deşarjı	9
2.3.4 Li-ion bataryaların güvenli çalışma bölgesi	13
2.3.5 Li-ion bataryaların uygulamaları	15
2.3.5.1 Kullanıcı Elektronik Uygulamaları	15
2.3.5.2 Elektrikli araçlar uygulamaları.....	16
2.3.5.3 Enerji depolama uygulamaları.....	18
2.3.5.4 Endüstriyel uygulamalar	19
2.3.5.5 Medikal uygulamalar	20
2.4 Karşılaştırma	21
2.5 Batarya Yönetim Sistemleri	22
2.6 Batarya Termal Yönetim Sistemleri	24
2.6.1 Soğutma Sistemleri	26
2.6.1.1 Hava soğutmalı sistemleri	26
2.6.1.2 Sıvı soğutmalı sistemleri	27
2.6.1.3 Faz değişim malzeme soğutma sistemleri.....	28
2.6.1.4 Karşılaştırma	29
2.6.2 Isıtma Sistemleri	31
3. MALZEME VE YÖNTEM	33
3.1 Alüminyum Hibrid Sistem Tasarımı	33
3.1.1 NiTi şekil hafızalı alaşımlar	33
3.1.2 NiTi model analizi	34
3.1.3 Mekanik tasarım.....	38
3.1.3.1 Tasarım I	38
3.1.3.2 Tasarım II	40
3.2 PCM Hibrid Sistem Tasarımı.....	43

3.2.1 Örnek Tasarımlar ve Uygulamalar	43
3.2.2 PCM-EG alt bileşenleri	44
3.2.3 Sistem dizaynı	46
4. BULGULAR.....	50
4.1 Sistemin modellenmesi ve doğrulaması	50
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	58
KAYNAKLAR.....	60
EKLER.....	68
ÖZGEÇMİŞ	91



KISALTMALAR

AGM	: Absorbed Glass Mat
BMS	: Battery Management System
BTMS	: Battery Thermal Management System
EG	: Expanded Graphite
EV	: Electric Vehicle
İHA	: İnsansız Hava Aracı
LGPCM	: Liquid-Gas Phase Change Material
Li-ion	: Lityum İyon
Li-Po	: Lithium Polymer
LTO	: Lithium Titanate Oxide
Ni-Cd	: Nickel Cadmium
Ni-MH	: Nickel Metal Hydride
NiTi	: Nikel Titanyum
OCV	: Open Circuit Voltage
PCM	: Phase Change Material
SLPCM	: Solid Liquid Phase Change Material
SMA	: Shape Memory Alloy
SSPCM	: Solid-Solid Phase Change Material
UPS	: Uninterruptible Power Supply

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2.1: Li-ion kimyasal yapılarının karşılaştırılması.....	7
Çizelge 2.2: Batarya kimyalarının karşılaştırması	22
Çizelge 2.3: Hücelere göre kapasite kaybı miktarı	25
Çizelge 2.4: BTMS Soğutma sistemleri karşılaştırılması.....	30
Çizelge 3.1: Sabit parametreler	37
Çizelge 3.2: Sıcaklığa bağlı parametreler	37
Çizelge 3.3: Mekanik tasarım ölçüleri.....	43
Çizelge 3.4: PCM-EG özellikleri	46
Çizelge 4.1: Panasonic-Sanyo NCR18650GA özellikleri	50
Çizelge 4.2: Şarj, deşarj ve dinlenme protokolü	53
Çizelge 4.3: Model parametreleri.....	53

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1: İkincil hücrelerin (Li-ion) iç yapısı	4
Şekil 2.2: Kurşun asit bataryalar	5
Şekil 2.3: (a) Örnek Power-Xtra Ni-Cd hücresi (b) Örnek Power-Xtra Ni-MH hücresi.....	6
Şekil 2.4: Li-ion içyapı çeşitleri, (a) Silindirik, (b) Prizmatik, (c) Buton, (d) Pouch	8
Şekil 2.5: Şarj-deşarj çevirim sayısına göre batarya kapasitesinin azalması	9
Şekil 2.6: Sabit Akım (CC) - Sabit Voltaj (CV) şarj profili	11
Şekil 2.7: Panasonic NCR1850GA hücresinindeşarj - akım karakteristiği	12
Şekil 2.8: Panasonic NCR18650GAdeşarj-sıcaklık karakteristiği	13
Şekil 2.9: Li-ion bataryalarının gerilim bakımından güvenli çalışma bölgesi.....	14
Şekil 2.10: Li-ion hücreler için önerilen çalışma sıcaklık aralığı	15
Şekil 2.11: Kullanıcı elektroniğinde Li-ion bataryalarının kullanımı	16
Şekil 2.12: Nissan ve Tesla markalı araçların batarya paketleri	17
Şekil 2.13: Hafif Elektrikli Araçlar için örnekler.....	18
Şekil 2.14: Enerji depolama uygulamaları.....	19
Şekil 2.15: Endüstriyel alandaki örnek uygulama.....	20
Şekil 2.16: Li-ion bataryası kullanılan bir ayak bileği protezi.....	21
Şekil 2.17: Makine öğrenmesi parametre tahmincisi (MLPE) yöntemiyle batarya modelleme mimarisi	24
Şekil 2.18: Jiaqiang ve arkadaşlarının model önerileri (Hava soğutmalı).....	26
Şekil 2.19: Silindirik hücreler için dolaylı sıvı soğutma sistemleri	27
Şekil 2.20: Xing batarya modülü	28
Şekil 2.21: Allcell PCM Modülü	29
Şekil 2.22: Isıtma yöntemleri (a) kendinden ısıtma, (b) Konvektif ısıtma, (c) Karşılıklı Darbeli Isıtma	31
Şekil 3.1: Şekil hafızalı alaşımı regülatör olarak kullanan batarya termal yönetim sistemi çalışması örneği	33
Şekil 3.2: NiTi alaşımının 5 çevirimde izobarik model sonucu.....	38
Şekil 3.3: Tasarım I	39
Şekil 3.4: Tasarım-I batarya paketi imalat aşamaları ve uygulamaları	40
Şekil 3.5: Tasarım II	41
Şekil 3.6: Tasarım-II batarya paketi imalat aşamaları ve uygulamaları	42
Şekil 3.7: Zhang grafit kompozit tasarımı	43
Şekil 3.8: Wang alüminyum kutu ve C-PCM tasarımı.....	44
Şekil 3.9: Genel SLPCM kategorileri.....	45
Şekil 3.10: PCM-NiTi hibrid BTMS model	47
Şekil 3.11: OFF modu - ON modu durumları.....	49
Şekil 4.1: 1Cdeşarjda pil terminal ve açık devre voltajı.....	51
Şekil 4.2: Validasyon sistemi.....	52
Şekil 4.3: Pil modelinin elektrokimyasal ve termal davranışının deneysel doğrulaması grafikleri.....	54

Şekil 4.4: OFF modunda batarya sıcaklığı (°C) profili	55
Şekil 4.5: (a) 3C ve (b) 5C deşarj oranlarında ON mod ve OFF mod sıcaklık artışları.	56
Şekil 4.6: (a) Volümetrik ve (b) 5C deşarjda çok ölçekli sıcaklık profili	56



Lİ-İYON BATARYA PAKETLERİ İÇİN AKILLI ADAPTRONİK TERMAL YÖNETİM SİSTEMİ TASARIMI

ÖZET

Enerji sektörünün büyümesiyle birlikte enerji depolama sistemlerinin de önemi giderek artmaktadır. Lityum-iyon (Li-ion) bataryaları enerji sektörünün merkezine yerleşmiştir. Son yıllarda, elektrikli hava, deniz ve kara araçlar, konut veya şebeke ölçeğinde enerji depolama için bu bataryaların kullanımı istikrarlı bir şekilde artmaktadır. Li-ion bataryaların avantajları; yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun ömürlü, düşük öz boşalım ve hafıza etkisinin olmamasıdır. Ancak bu bataryalarının kullanımındaki en büyük dezavantaj batarya grubunun yönetilmesinin gerekli olmasıdır. Bu konuda Li-ion bataryaların termal yönetimi kritik bir konudur. Düşük sıcaklık, bataryanın kapasitesini düşürürken yüksek sıcaklıklar patlama riskinin yanı sıra bataryanın ömrünü kısaltıp bozulmaya neden olmaktadır. Ayrıca, batarya grupları birçok seri ve paralel hücrelerden oluştuğundan ısı dağılımı paketin çeşitli noktalarda fark gösterip ısı dağılımının dengesiz yayımına sebep olabilmektedir. Batarya Termal Yönetim Sistemleri (BTMS) bu eksikliklere çözüm getirebilmektedir. Li-ion bataryaların termal yönetimi için birçok sistem türü mevcuttur. Bunlardan hava ile yönetim, sıvı ile yönetim, faz değişim malzeme (PCM) ile yönetim, kendinden ısıtma ve birçok hibrid sistem veya yenilikçi sisteme de rastlanılmaktadır. Bu sistemlerin her biri belirli avantajlara ve dezavantajlara sahiptir. Ancak, özellikle hafif elektrikli araçlar gibi ağırlık ve maliyetin önemi daha da fazla olan uygulamalarda faz değişim malzemeler ile yönetim sistemleri öne çıkmaktadır. Diğer taraftan kendinden ısıtma yöntemi maliyet ve performans bakımından diğer yöntemlere göre büyük avantajlara sahiptir. Bu çalışmada, iki farklı sistem önerisi yapılmıştır. Birincisinde, şekil hafızalı (bellekli) alaşımlardan nikel-titanyum (NiTi) alaşımlar kullanılarak, tekli ve dörtlü olmak üzere akıllı, adaptronik ve modüler iki tasarım önerisi yapılmıştır. Bataryadan veya harici kaynaktan enerji gereği duymadan pasif bir sistem olan bu tasarımlarda hava ve bataryanın ısı durumuna göre soğuk ve sıcak ortamlar arasında durum değiştirebilmektedir. Bu sayede batarya grubunun yıl boyu farklı iklimlere sahip bölgelerde yüksek şarj/deşarj işlemini yapabilmesine izin verilebilecektir. İkinci sistem önerisi ise, bir önceki sisteme faz değişim malzemeler ekleyerek yenilikçi ve hibrid bir tasarım önerisi yapmaktadır. Bu sistemde ise, batarya paketinin özellikle soğutma işleminde verimi artırılmaktadır. Sistemin modellenmesi ve doğrulama işlemleri ayrıca yapılmış olup tezde sunulmuştur. Bunun sonucunda 5Cdeşarj oranında pil sıcaklığı soğutmasız 3Cdeşarj sıcaklık performansı sonucuna benzer sonuç gözlemlenmiştir. Her iki önerinin uygun maliyetli, hafif, seri üretime uygun, yüksek performanslı, hem soğuk hem sıcak iklimlere uyumlu ve pasif özellikleri ile diğer sistemlere göre daha avantajlı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Lityum İyon Batarya, Batarya Termal Yönetim Sistemi, Şekil Hafızalı Alaşım, Faz Değişim Malzeme.*

SMART ADOPTRONIC THERMAL MANAGEMENT SYSTEM DESIGN FOR LI-ION BATTERY PACKS

ABSTRACT

With the growth of the energy sector, the importance of energy storage systems is increasing. Lithium-ion (Li-ion) batteries have been placed at the center of this energy sector. In recent years, the use of these batteries for electric air, marine, and land vehicles, residential or grid-scale energy storage has been growing steadily. The advantages of Li-ion batteries are high energy and power density, long life, low self-discharge, and no memory effect. However, the biggest disadvantage in the use of these batteries is that the battery group needs to be managed. In this regard, the thermal management of lithium-ion batteries is a critical issue. While low temperature reduces the capacity of the battery, high temperatures cause the risk of explosion as well as shorten the life of the battery and cause deterioration. In addition, since the battery groups consist of many series and parallel cells, the heat distribution may differ at various points in the package and this may cause unbalanced distribution of the heat distribution. Battery Thermal Management Systems (BTMS) can provide solutions to these deficiencies. Many types of systems are available for the thermal management of Li-ion batteries. Among these, air management, liquid management, phase change materials management, self-heating, and many hybrid systems or innovative systems are also encountered. Each of these systems has advantages and disadvantages. However, the phase change materials (PCM) and management systems come to the fore, especially in applications where weight and cost are even more important, such as light electric vehicles. On the other hand, the self-heating method has great advantages over other methods in terms of cost and performance. In this study, two different system proposals were made. In the first, two smart, adaptronic, and modular design proposals, single and quadruple, were made by using nickel-titanium (NiTi) shape memory alloys. In these designs, which are a passive system without the need for energy from the battery or external source, the state can change between cold and hot environments according to the temperature of the air and the battery. In this way, it will be possible to allow the battery group to perform high charge/discharge operations in regions with different climates throughout the year. The second system proposal makes an innovative and hybrid design proposal by adding phase change materials to the previous system. In this system, the efficiency of the battery pack was increased, especially in the cooling process. The modeling and verification processes of the system were made, and presented in the thesis. A result similar to the result of 3C discharge temperature performance without cooling of the battery temperature at 5C discharge rate was observed. Both proposals will have more advantages over other systems with their features such as being cost-effective, lightweight, suitable for mass production, high performance, compatible with both cold and hot climates, and passive.

Keywords: *Lithium Ion Battery, Battery Thermal Management System, Shape Memory Alloy, Phase Change Material*

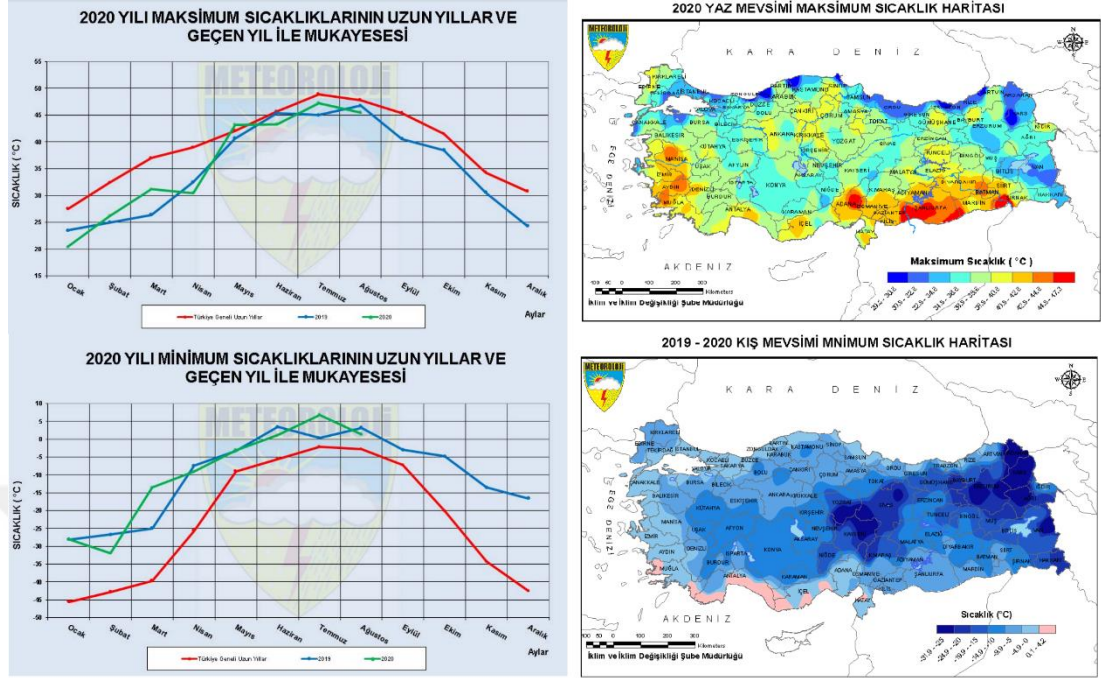
1. GİRİŞ

1.1 Çalışma Konusu

Enerji sektörünün yenilenebilir enerjiler alanındaki pil teknolojilerinin gelişimi, şarj edilebilir pilleri, özellikle lityum iyon bataryaları gelecekteki enerji sektörünün merkezine yerleştirmiştir. Son yıllarda, elektrikli araçlar, dronlar ve konut veya şebeke ölçeğinde enerji depolama için Li-ion bataryaların kullanımı, tüketici elektroniği pazarında istikrarlı bir şekilde artmaktadır (Chu et al, 2016; Dunn et al, 2011; Julien et al, 2016). Li-ion bataryaların avantajları yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun ömürlü, düşük öz boşalım ve hafıza etkisinin olmamasıdır. Ancak bu bataryalarının kullanımındaki en büyük dezavantaj batarya grubunun yönetilmesidir. Bu konuda Li-ion bataryaların termal yönetimi kritik bir konudur. Li-ion hücrelerinin performansı pillerin çalışma sıcaklığı ile doğrudan ilişkilidir. Düşük sıcaklık bataryanın kapasitesini düşürürken yüksek sıcaklıklar patlama riskinin yanı sıra bataryanın ömrünü kısaltıp bozulmaya neden olmaktadır. Ayrıca batarya grupları birçok seri ve paralel hücrelerden oluştuğundan ısı dağılımı paketin çeşitli noktalarda fark gösterip ve bu da ısı dağılımının dengesiz yayımına sebep olmaktadır (Du et al, 2018).

Günümüzde elektrikli araçlar gibi teknolojilerin yüksek şarj/deşarj özelliğinin gerekliliği ve ayrıca batarya paketlerinin farklı iklimlere sahip ülkelerin tüm bölgelerinde batarya performansının etkilenmesi, bu problemin önemini daha arttırmaktadır (Hao et al, 2018). Şekil 1.1 incelendiğinde (mgm.gov.tr, 2020). Türkiye de bu özelliklere sahip bir ülke olarak nitelendirile bilinir. Örneğin Türkiye'nin Sıcaklık Ekstrem haritasına bakıldığında, yaz mevsimindeki maksimum sıcaklık aralığı ülke genelinde $+29^{\circ}\text{C}$ ile $+47^{\circ}\text{C}$ arasında değişebilmektedir. Bu değer, kış mevsimindeki minimum sıcaklık olarak -31°C ile $+4^{\circ}\text{C}$ arasındadır. Ayrıca yıl bazında bakıldığında, Türkiye'de 12 ay boyunca aylar arasında yaklaşık maksimum sıcaklıklar 22°C fark edebilmektedir. Aynı bağlamda minimum sıcaklıklar farkı ise yaklaşık 38°C 'dir. Bu değerler göz önünde bulundurulduğunda,

Türkiye’deki iklim farklılıklarının batarya paketleri performanslarına ciddi etkisi olabileceğini görebiliyoruz.



Şekil 0.1: Aylara ve bölgelere göre Türkiye’de sıcaklık değişimi

Kaynak: (mgm.gov.tr, 2020)

Li-ion batarya paketlerinin sıcaklık yönetimi konusunda ana konu ikiye ayrılmaktadır. Birincisi, batarya paketi bütünü ortamin iklimine karşıt yönetimi, ikincisi ise, batarya paketinin içindeki hücreler arası dengesizlik ve tehlikeye neden olabilen sıcaklık yönetimidir. Bu konu kapsamındaki problem alt başlıkları aşağıda kısaca sıralanmıştır:

1. Soğuk havalarda: Pil 15°C altına düştüğünde kapasite, güç ve verimlilik düşüşü meydana gelir (Pesaran et al, 2013). (birçok sistemde bu değerin altına düştüğünde sistem kapanır.)
2. Sıcak havalarda: Yaklaşık her 13°C derecelik ısınmada pil ömrü yarıya düşer (Keyser et al, 2017) ve bu da ürün maliyete yansır.
3. Hızlı şarj/deşarj: bataryaların hızlı şarj/deşarj işlemlerinde batarya fazlasıyla ısınır ve ömrü azalır. Düşük sıcaklıklarda hızlı şarj/deşarj işlemlerinin verimi düşüktür.
4. Farklı bölgeler: Türkiye gibi birçok ülkede, var olan ürünler bölgesel olarak müşterilere hitap eder. Farklı iklimlerde yaşayan (çok sıcak/çok veya

sıcak/soğuk ayların farkının çok olduğu bölgelerde) müşteriler üründen yeterli verimi alamaz.

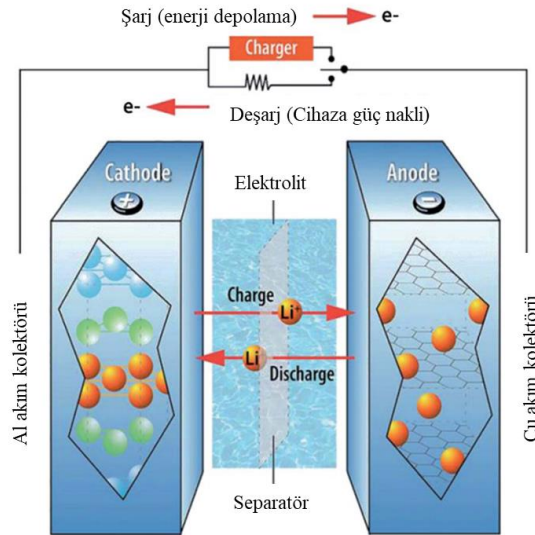
5. Dengesiz sıcaklık dağılımı: Soğutma ve ısıtma dengeli bir şekilde bütün hücrelere dağılamaz. Bu da verimsizliğe yol açar (Pesaran, 2002).
6. Var olan sistemlerin problemi: En iyi çözüm olarak görünen ‘Sıvıyla Termal Yönetimi’, yeterli hızda anahtarlama kontrastına (ısıtma modundan soğutma moduna ve tersi geçiş hızı) sahip değildir. Pahalı, ağır, komplekstir ve her uygulamaya monte edilemez. Ağır olduklarından dolayı, taşınabilir veya özel görev cihazlarında kullanışlı değildir.

1.2 Tezin Amacı

Problem tanımlarına dayanarak sorunların giderilmesi için yenilikçi bir Batarya Termal Yönetim Sistemi (BTMS) tasarımının yapılması hedeflenmektedir. Bu hedef kapsamında, sıcak/soğuk havalarda batarya grubunun sıcaklığının anahtarlama süresini düşürmenin yanı sıra Li-ion bataryalarının ideal çalışma sıcaklığında tutulması öngörülmektedir. Ayrıca batarya grubunun ısı dağılımında noktasal tespitlerle her pilin ayrı bir şekilde sistem tarafından değerlendirilmesi yapılacaktır. Çalışmanın sonucunda, çeşitli iklimlere sahip bölgelerde ve/veya hızlı şarj/deşarj özelliği gerektiren batarya paketleri için bir pasif ısı yönetim sistemi geliştirilecektir. Hedeflenen sonucun gerçekleşmesiyle, uygun maliyetli, verimli, hafif ve bataryanın beslemesine gerek duymayan BTMS sistem önerisi yapılmış olacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bataryalar en temelinde birincil (şarj edilmeyen) ve ikincil (şarj edilebilen) gruplarına ayrılırlar. Herhangi bir elektrokimya bataryası en az bir hücreden oluşmaktadır. Bu hücreler birden fazla olması gerektiği durumda bir batarya içerisinde seri ve/veya paralel bağlandığında bataryanın voltajı ve kapasitesini belirlemiş olurlar. Çalışmanın konusuyla ilgili olan ikincil hücrelerin genel çalışma şekline bakıldığında (Şekil 2.1), genelde bütün hücreler, katot, anot, elektrolit ve separatör olarak dört temel bölümden yapılır. Deşarj sırasında Anot bölümü yüke elektronları gönderir ve elektrokimyasal reaksiyon sırasında oksitlenir. Katot ise bu elektronları alır ve bahsi geçen reaksiyon sırasında azalır. Elektrolit ise, katot ve anot elektrotları arasında iyon aktarım işlemini gerçekleştirir. Hücrenin ana kimyasına göre elektrolitler katı, sıvı veya yapışkan olabilir. Ayrıca bu iki elektrot bir separatör vasıtasıyla birbirinden ayrı bölümlerde tutulur. Şarj sırasında ise bu işlemin tersi gerçekleşir (Osiak et al, 2014). Şarj sırasında katot, pozitif elektrot olarak, anot ise, negatif elektrot olarak adlandırılır. Deşarj sırasında ise anot, pozitif elektrot olarak, katot ise, negatif elektrot olarak kabul edilir.



Şekil 2.1: İkincil hücrelerin (Li-ion) iç yapısı

Kaynak: (Osiak et al, 2014)

İkincil batarya hücrelerin en yaygınlarından kurşun asit aküler, Nikel tabanlı hücreler ve lityum metal hücrelere değinebiliriz. Çalışma kapsamında bu yaygın türlerin özellikleri özet olarak sunulmuştur.

2.1 Kurşun Asit Bataryalar (Pb)

Kurşun asit aküler ilk olarak 1859'de, Gaston Planté tarafından geliştirilip ticarileştirilmiştir. Diğer yaygın hücrelere göre en eski olup uzun ticari tarihe sahip olan kurşun asit aküler otomotiv, telekomünikasyon, sanayii, solar sistemler, UPS, deniz altı ve savunma sanayi gibi birçok uygulamada günümüzde de kullanılmaktadır. İçten yanmalı araçlardan önce kurşun asit akülerle ticarileşmiş olan elektrikli araçlar olsa da, benzinli ve diğer fosil yakıtlı araçlar tercih edilen başlıca araçlar haline geldiğinden bu araçların devamı uzun bir süre gelmemiştir. Ancak diğer uygulamalarda halen yaygınlığını sürdürmektedir. Aşağıda Birikim Pilleri firmasının bazı kurşun asit bataryalarının örnek görseli (Şekil 2.2) ve bunların kimyasal reaksiyon denklemi (2.1) sunulmuştur.



Şekil 2.2: Kurşun asit bataryalar



Kurşun asit akülerin hücre voltajı 2 V olup en temelinde sıvılı (flooded) ve kuru olarak ikiye ayrılır. Son yıllarda sıvılı aküler her ne kadar ömürleri daha uzun olsa da sızdırma gibi nedenlerden tercih edilmemektedir. Kuru aküler veya VRLA bataryalar özellikle elektrolit yapılarıyla diğer akülerden farklı olup bakım gerektirmeyen türdendirler. Elektrolitlerinin sabit kalabilirliği bakımından Absorbed Glass Mat (AGM) ve jel olarak ikiye ayrılırlar. Son yıllarda bu aküler, medikal cihazlar,

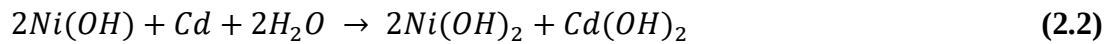
tekerlekli sandalyeler, acil aydınlatma, taşınabilir cihazlar, elektrikli el aletleri, kesintisiz güç kaynaklarında (UPS), forklift ve golf araçları gibi birçok uygulamada kullanılmaktalar (Jung et al, 2015; Brivio 2012).

2.2 Nikel Tabanlı Bataryalar (Ni-Cd / Ni-MH)

Nikel tabanlı bataryalar birçok alt kimyaya sahip olsa da bunlardan en yaygını Nickel-Cadmium (Ni-Cd) ve Nickel metal-hydride (Ni-MH) hücrelerdir. Ni-Cd ve Ni-MH bataryaların kimyasal reaksiyonlarının eşitlikleri sırasıyla (2.2) ve (2.3) sunulmuştur. Bu hücrelerin voltajı kurşun asit hücrelerden daha düşük olup yaklaşık 1.2 V'dur. Ni-Cd hücrelerinin elektrotları, nikel hidroksit ve metalik kadmiyum oluşur. Bu hücrelerin en büyük dezavantajları zehirli bir metal olan kadmiyum içermesi ve hafıza etkisinin olmasıdır. Hafıza etkisi pilin kısmen deşarjından sonra şarj edilmesi durumunda pilin mevcut kapasitesinin önemli ölçüde azalabileceği anlamına gelmektedir. Bu etki bazı durumlarda onarılabilir ancak genelde zamanla tam şarj/deşarj yapılmadığın pil kapasite kaybına uğraması muhtemeldir (Lacerda et al, 2009; Reddy 2011). Ayrıca bu hücreler ağır metal içerip çevreye son derece zararlı olduğundan Avrupa'da genel uygulamalarda kullanımı yasaklanmıştır (European Parliament, 2013).



Şekil 2.3: (a) Örnek Power-Xtra Ni-Cd hücresi (b) Örnek Power-Xtra Ni-MH hücresi



Ni-MH hücreleri içyapı olarak Ni-Cd hücrelerine benzerler. Negatif elektrottaki hidrojen bu hücreleri ayrı bir alt kimya kategorisine yerleştirmektedir. Bu karışım

hücrelerin enerji yoğunluğunu arttırmaktadır (70-100 Wh/kg). Ayrıca ağır metal içermediğinden geri dönüşümü daha kolaydır. Ancak hafıza etkisi özelliğini azaltmış olsa da halen taşımaktadır. Özellikle düşük akım gerektiren, taşınabilir elektronik cihazları ve bazı medikal, savunma sanayii cihazlarda kullanılmaktadır (Zhu et al, 2013; Fetcenko, 2007).

2.3 Lityum İyon Bataryalar (Li-ion)

Diğer yaygın pil teknolojilere göre yeni bir teknoloji olarak bilinen Lityum iyon (Li-ion) piller, 1990'larda ticarileşmeye başlamış olup daha sonra özellikle uzak doğu ülkelerinde geliştirmeler yapılmıştır. Hücre kimyasında iyileştirme amaçlı araştırma ve geliştirme çalışmaları günümüzde de devam etmektedir. Bu çalışmaların temel amacı pilin kapasitesi, güvenliği, şarj/deşarj değerleri ve ömürleri konusunda iyileştirmeler yapmaktır. Li-ion bataryalardan örnek bir kimyasal reaksiyon eşitliği aşağıda (2.4) verilmiştir.



2.3.1 Li-ion bataryaların çeşitleri

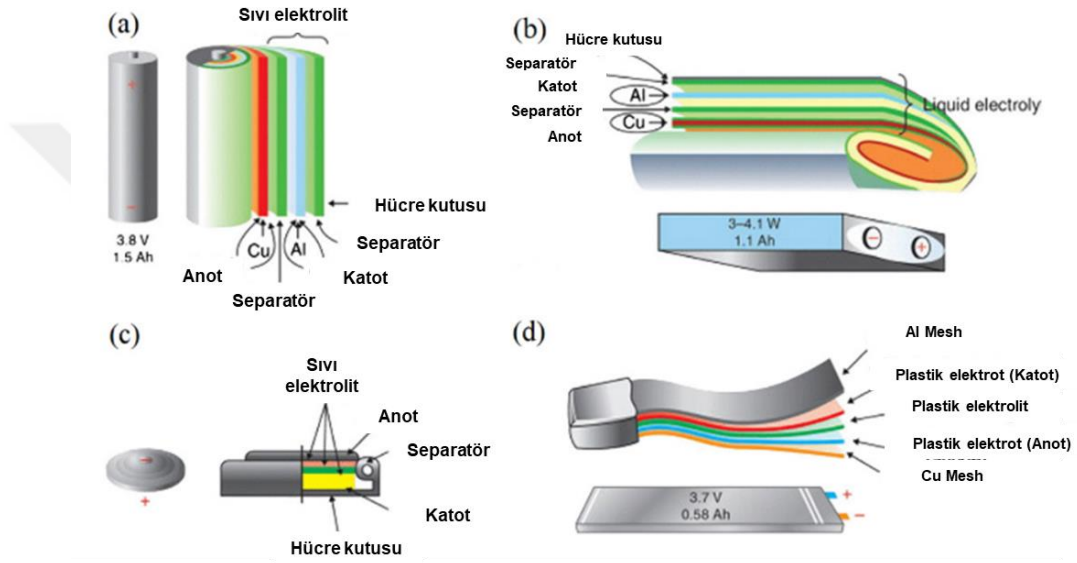
Li-ion piller, alt kimya, boyut ve içyapı olarak birçok türdedir. Alt kimya türleri genelde katot elektrotundaki materyallerinin değişimi ile gerçekleşmektedir. Katot elektrotuna göre ticarileşmiş yaygın türlerin karşılaştırması Çizelge 2.1'de verilmiştir. Son yıllarda anot ucu için silikon ve Lithium Titanate Oxide (LTO) kullanıla bilse de en yaygın anot kimyası grafit veya diğer karbon türleri kullanılmaktadır (Garche et al 2018).

Çizelge 2.1: Li-ion kimyasal yapılarının karşılaştırılması

Materyal	Kısaltma	Açıklama
LiCoO₂	LCO	Orijinal ticari tür, pahalı
LiNi_{0.8}Co_{0.15}Al_{0.05}O₂	NCA	Birim kütle başına en yüksek enerji yoğunluğu
LiNi_{1-x-y}Mn_xCo_yO₂	NMC/NCM	LCO'dan daha güvenli ve daha ucuz İyi çevrim ömrü
LiMn₂O₄	LMO	LCO'dan daha güvenli ve daha ucuz, düşük çevrim ömrü
LiFePO₄	LFP	Çok güvenli, yüksek güç, ancak daha düşük enerji yoğunluğu, Yüksek sıcaklıkta yüksek kararlılık

Kaynak: (Reddy 2011)

Li-ion piller, içyapısı ve görünümü açısından temelde dört çeşide ayrılır. Şekil 2.4’de silindirik, prizmatik, buton ve pouch içyapı çeşitleri sunulmuştur (Garche et al 2009). Bu çeşitlerin en yaygını silindirik hücreler olup çap ve uzunluk boyutlarına göre 18650 (18mm çap, 65mm uzunluk), 21700 (21mm çap, 70mm uzunluk) vb. gibi isimlendirilirler. Uygulamaya göre en uygun tür seçilip tekli veya modülleri, seri/paralel bağlantılarla birleştirilerek batarya gurubu şeklinde kullanılabilir. En yaygın hücre içyapısının silindirik olmasından dolayı bu çalışmada bu yapıya odaklanacaktır.



Şekil 2.4: Li-ion içyapı çeşitleri, (a) Silindirik, (b) Prizmatik, (c) Buton, (d) Pouch

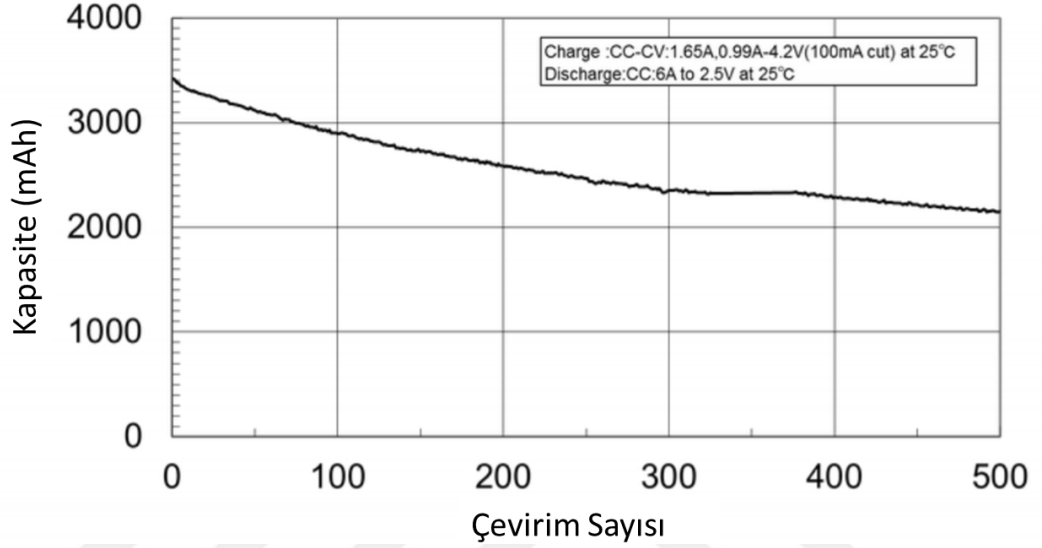
Kaynak: (Garche et al 2009)

Li-ion bataryalar, elektronik cihazlar (cep telefonu, notebook vb.), elektrikli araçlar (Araba, uçak, gemi, bisiklet, scooter vb.), aydınlatma, medikal, güç kaynakları, solar depolama, mobil üniteler ve birçok benzeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Diğer bir çeşit olarak Li-Po piller ise, katı polimer elektrolitten yapıldığı için özel boyutlarda tasarlanabilmekte olup yüksek deşarj oranına sahiptir. Bu türler ise genelde hobi sektörü veya insansız hava araçlarında (İHA) kullanılmaktadır.

2.3.2 Li-ion bataryaların enerji kapasitesi

Bir bataryanın kapasitesi, sağlayabileceği enerjiyi Amper-Saat (Ah) cinsinden belirten temel performans göstergesidir. Diğer taraftan, batarya kapasitesine göre şarj/deşarj yeteneğini değerlendirmek için C oranı (C-rate) kullanılmaktadır. İdeal bir koşulda bir saat içinde, bir bataryanın sağlaması gereken akım 1C olarak ifade

edilmektedir. Örneğin batarya kapasitesi $1C=3450mAh$ olan Panasonic NCR18650GA bataryalar bir saat içinde 3450mA akım sağlamaktadır (NCR18650GA Datasheet, 2022).. Çok sayıda şarj ve deşarj işlem döngüsü, zamanla bataryanın kapasitenin ve ömrünün azalmasına neden olmaktadır. Şekil 2.5’de Panasonic firmasının NCR18650GA ürünü üzerinde kapasitesinin şarj deşarj çevrim sayısına göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Şarj-deşarj çevrim sayısına göre batarya kapasitesinin azalması

Kaynak: (NCR18650GA Datasheet, 2022)

2.3.3 Li-ion bataryaların hücre gerilimleri ve şarj/deşarjı

Açık devre (OCV) batarya gerilimi, bir bataryanın şarj edilmezken veya bir yüke bağlı değilken sahip olduğu gerilim potansiyelini ifade etmektedir. Bataryanın, hücre başına açık devre gerilimi, şarj durumu ile ilişkilidir. NMC Li-ion bataryaların nominal hücre gerilimi 3.6V-3.7V ve deşarj kesme gerilimi ise 2.5V-2.75V’tur. Deşarj kesme gerilim değeri, bir batarya hücresinin deşarj edilebileceği en düşük voltaj değerini ifade etmektedir. Hücre geriliminin deşarj kesme gerilim değerinin altında düştüğü durumlarda batarya elektrokimyasal yapısında kalıcı bozulmalar olmanın yanı sıra bataryaya zarar görebilmektedir.

Li-ion bataryalar ile diğer şarj edilebilir bataryaların nominal hücre gerilimlerinin karşılaştırmasını göstermektedir. Li-ion bataryalar, Ni-MH ve Ni-Cd bataryalarının yaklaşık 3 katı, Kurşun Asit bataryaların yaklaşık 1,5 katı daha yüksek nominal voltaja sahiptir. Bu sebeple Li-ion bataryalar yüksek gerilim ihtiyacını daha az seri hücre ile sağlayabilmektedirler. Li-ion bataryaların hataya toleransı %1’in altındadır.

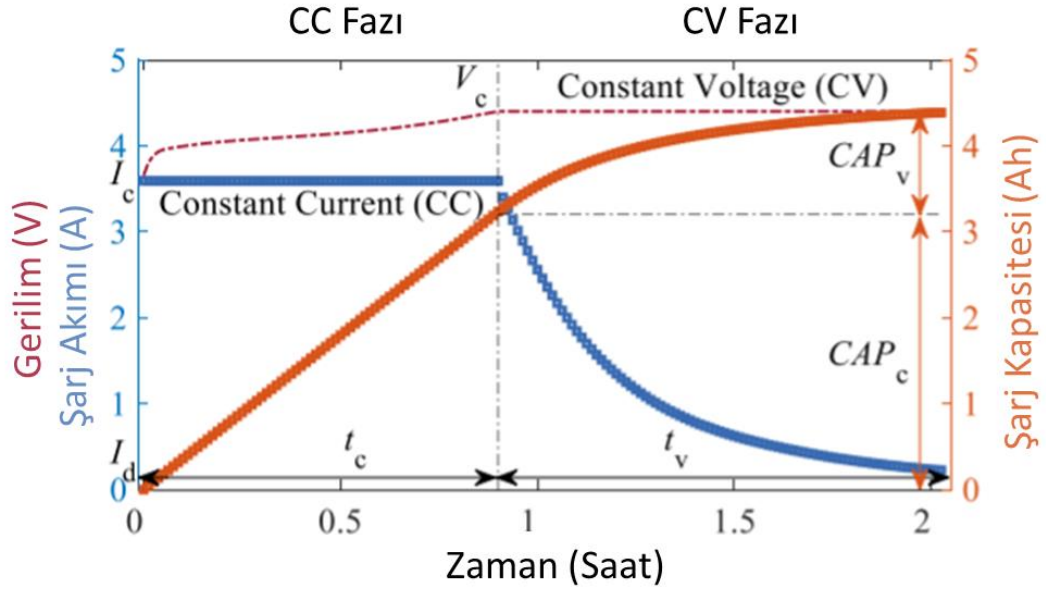
Diğer bir deyişle, kesme şarj gerilimi için maksimum değer 4.2V ise hata toleransı 0.042V'dur. Şarj işlemi esnasında bu sınır değeri aşan hücreler zarar görmektedir.

Kapalı devre gerilimi, bataryanın şarj veya deşarj işlemleri sırasında ölçülen gerilim değeridir. Kapalı bir döngü içerisinde olan bataryalarda dinamik bir gerilim değeri görülmektedir. Batarya iç direncine bağlı olarak eğer batarya deşarj ediliyor ise ölçülen gerilim değeri, açık devre gerilim değerinden daha küçük; şarj ediliyor ise de açık devre geriliminden daha büyük bir değer olarak ölçülür.

Li-ion bataryalarda şarj, batarya ömrü ve batarya performansı açısından oldukça önemli bir konudur. Doğru şarj yöntemleri pillerin daha sağlıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlarken, yanlış şarj uygulamaları ise pillere zarar verebilmekte ve tehlikeli kazaların meydana gelmesine sebep olabilmektedir (Battery University, 2022).

Bir batarya şarj olurken, anottan katotta doğru bir iyon hareketi olur. Katotta ulaşan iyonlar burada birikmeye başlar, katot bölgesindeki biriken iyon miktarı arttıkça batarya şarj olmakta yani bataryanın sağladığı enerji kapasitesi de artmaktadır.

Li-ion bataryalar şarj edilirken genelde Sabit Akım (CC) - Sabit Voltaj (CV) metodu kullanılmaktadır (Şekil 2.6). Bu metoda göre batarya önce sabit bir akım değeriyle şarj edilmektedir. Sabit akım bölgesindeyken bataryanın gerilim değeri, hücre için belirlenen maksimum değere ulaşmaya kadar göreceli olarak keskin bir eğimle artmaktadır. Gerilim değeri maksimum değere ulaştığında, şarj cihazı çıkış gerilimini sabitlemektedir. Gerilim değerinin sabit olmasını sağlayabilmek için çıkış akım değeri gerilim geri beslemesiyle sürekli azaltılmaktadır. Şarj esnasında hücrenin kapalı devre gerilimi açık devre geriliminden daha yüksek olarak görülmektedir. Batarya hücresinin maksimum doluluk oranına ulaşabilmesini sağlamak adına çıkış akımı belirlenen geri besleme algoritmasına göre sürekli azaltılarak çıkış geriliminin sabit kalması sağlanmaktadır. Bu aşamaya doyumluk şarj aşaması adı verilmektedir. Kapalı devre gerilim değerinin açık devre gerilim değerine neredeyse eşit olduğu noktada şarj akımı tamamen kesilir ve şarj tamamlanmış olur. Şarj akımı için bu kesme akım değeri Li-ion hücrelerde genellikle 0.02C'dir.



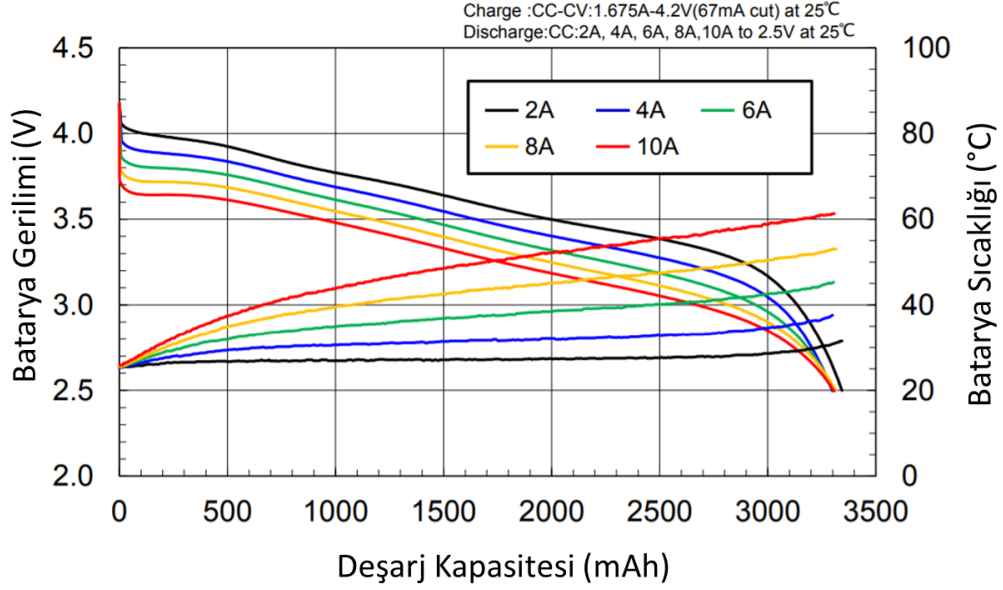
Şekil 2.6: Sabit Akım (CC) - Sabit Voltaj (CV) şarj profili

Kaynak: (Lui et al, 2020)

Li-ion bataryaların şarjı için farklı metotlar bulunmaktadır. Standart şarj, genel şarj ve hızlı şarj metotları yaygın olarak kullanılmaktadır. Standart şarj işlemi üretici tarafından önerilen ve batarya kimyasına en uygun şarj yöntemidir. Genel şarj yönteminde, zaman tasarrufu sağlamak için bataryanın izin verdiği en yüksek şarj akım değeri kullanılmaktadır. Genel şarj yöntemi, standart şarj yöntemine göre bataryanın daha hızlı yaşlanmasına ve kullanım ömrünün azalmasına neden olmaktadır (Karadeniz, 2017).

Hızlı şarj yönteminde, yüksek şarj akımı kullanılmaktadır ve bu değer standart şarj yönteminin 5 katıdır. Hızlı şarj yöntemi batarya ömrüne olumsuz yönde etkilerinden dolayı uzun kullanım ömrü gerektiren uygulamalarda genellikle tercih edilmeyen bir yöntemdir. Hızlı şarj yöntemi kullanım sırasında birçok riskler ve tehlikeler barındırmaktadır. Bu sebeple hızlı şarj yönteminin kullanıldığı uygulamalarda olası kazaların önlenmesi ve batarya güvenliğinin sağlanması için daha fazla tedbir almak gerekmektedir.

Şekil 2.7’de Panasonic NCR18650GA bataryasının farklı deşarj oranlarında kapasiteye etkisi ve bunların sıcaklık bakımından hangi sonuçlar verdiği sunulmuştur. Şarj/deşarj akım değeri yükseldikçe oluşan sıcaklığın arttığı açık bir şekilde görülmektedir. 10A deşarj değerinde batarya sıcaklığının 60°C’nin üstüne çıktığı görülmektedir. Bu da tehlikeli bölgeye yaklaşmak demektir (NCR18650GA Datasheet, 2022).

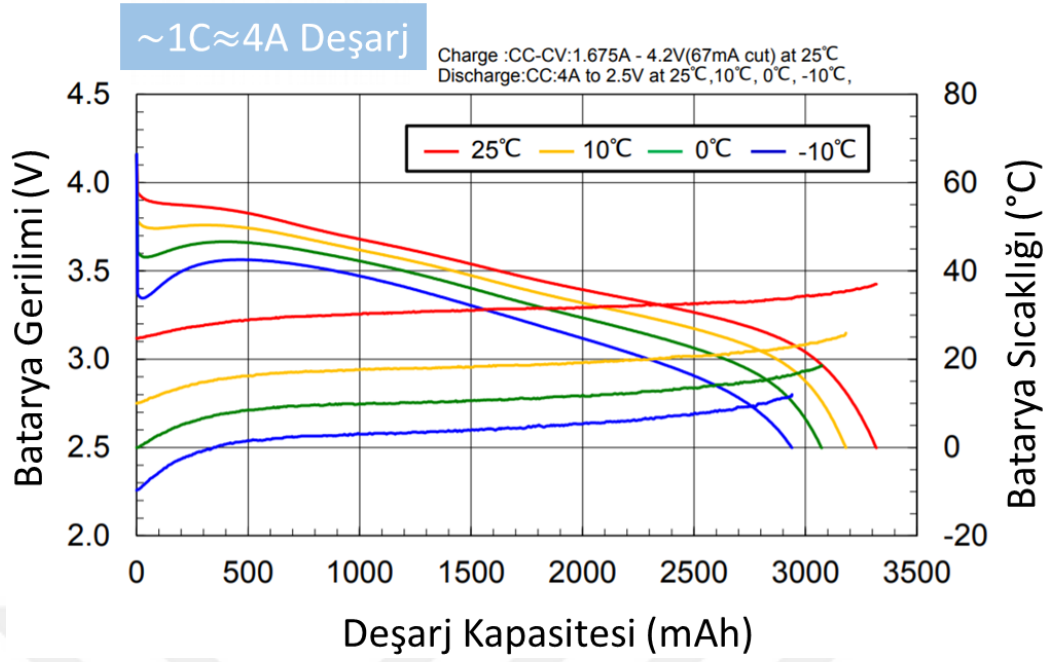


Şekil 2.7: Panasonic NCR1850GA hücresinin deşarj - akım karakteristiği

Kaynak: (NCR18650GA Datasheet, 2022)

Li-ion bataryaların deşarj işlemi sırasında da dikkat edilmesi gereken bazı önemli durumlar vardır. Li-ion bataryaların maksimum deşarj akım değeri bataryanın modeline, kontak yapısına, kimyasal özelliğine göre 0.5C'den 30C'ye kadar değişiklik gösterebilmektedir. Üretici tarafından belirlenen maksimum deşarj akımı değerinin üzerine çıkıldığı durumlarda, bataryalar termal hasarlar alabilmektedir. Buna ek olarak hücrelerin elektrokimyasal yapıları bozulabilmektedir. Bu durumlar da batarya hücreleri için kalıcı bozulmalara neden olabilmektedir.

Deşarj işlemi sırasında oluşan termal enerji, bataryada depolanan enerjiden elde edilmektedir. Akım değerinin yüksek olması, termal enerjinin fazla olmasına sebep olmaktadır. Bu durum da bataryanın efektif kullanılabilir kapasitesinin düşmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan sıcaklıkta kapasiteye önemli bir etkisi vardır. Şarj ve deşarj esnasında soğuk koşullar bataryanın başlangıç ve bitiş gerilimini olumsuz etkilemektedir. Bu da örnek olarak sunulan Şekil 2.8'de Panasonic NCR18650GA Li-ion hücresinde de görüldüğü üzere kapasitesini azaltmaktadır.



Şekil 2.8: Panasonic NCR18650GA deşarj-sıcaklık karakteristiği

Kaynak: (NCR18650GA Datasheet, 2022)

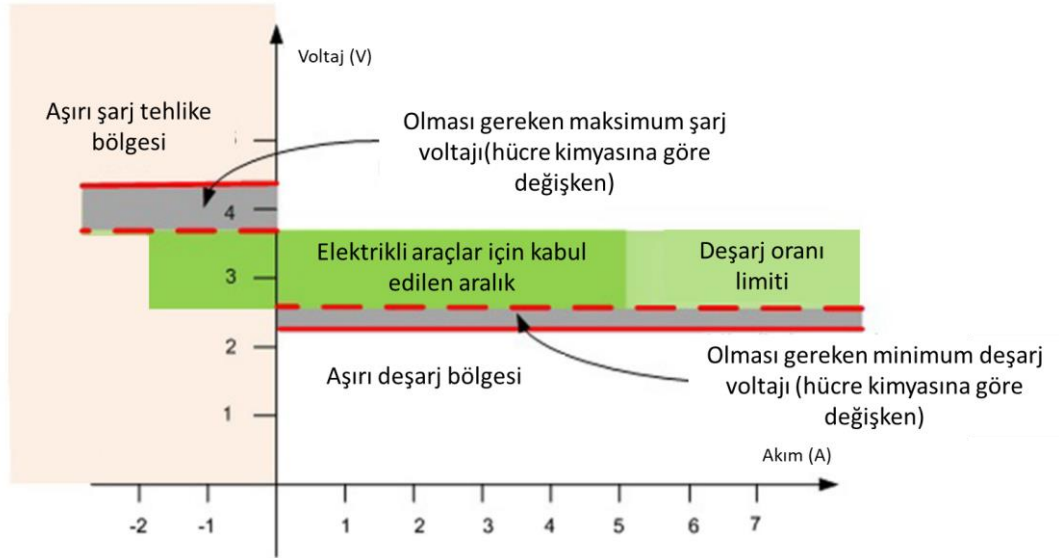
Aşırı şarj ve aşırı deşarj işlemi, bataryalara zarar vermektedir. Bir batarya hücresi maksimum şarj değerine ulaştığında, anotta biriken Li-ion hücreleri tamamen doyuma ulaşmış demektir. Şarj işleminin devam etmesi, doymuş iyonların uyarılmaya devam edilmesi anlamına gelmektedir. Bu durum bataryaların aşırı ısınmasına sebep olmaktadır. Bataryaların aşırı ısınması sonucu patlama, yangın gibi güvenlik problemleri oluşabilmektedir.

Bir batarya hücresinin minimum hücre gerilim değerinden daha düşük bir değerde deşarj işlemine devam edilirse, bataryalarda kalan enerji hızlı bir şekilde boşalmaktadır. Bu durum sonucunda bataryanın anot ve katot bölgeleri arasında oluşumlar birikerek hücrenin kısa devre olmasına yol açmaktadır. Kısa devre olan bataryalar zarar görmektedirler ve kullanılmaz duruma gelmektedirler (Battery University, 2022; Karadeniz, 2017).

2.3.4 Li-ion bataryaların güvenli çalışma bölgesi

Sıcaklık ve gerilim, Lityum batarya hücrelerinin performansını belirleyen en önemli parametrelerdir. Şekil 2.9, hücreler için belirlenen gerilim, akım sınır değerlerini ve batarya hücrelerinin güvenli çalışma bölgesi adı verilen gri ve yeşil bölge ile belirtilmiş alan içerisinde kullanılması gerektiğini göstermektedir. Bir hücrenin

güvenli çalışma bölgesi dışında kullanılması hücrenin kalıcı zarar görmesine neden olabilmektedir.



Şekil 2.9: Li-ion bataryalarının gerilim bakımından güvenli çalışma bölgesi

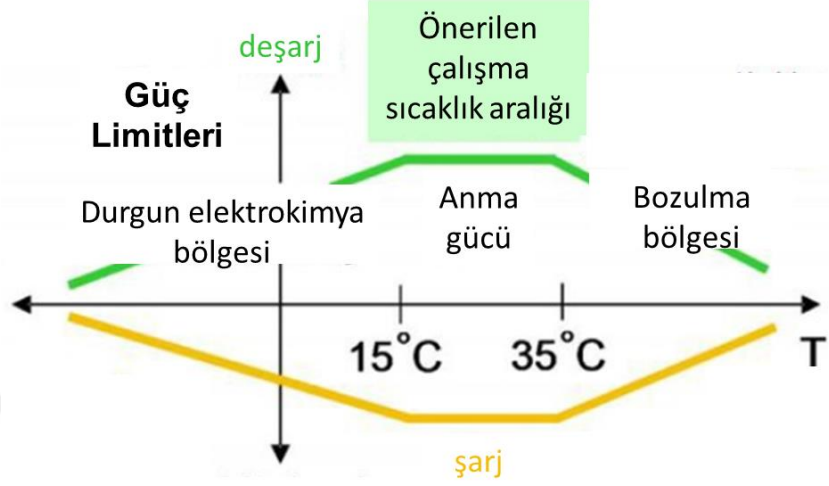
Kaynak: (Rezvanizani et al, 2014)

Li-ion hücreler aşırı voltaja (OverVoltage) maruz kaldıkları zaman hücrelerin anodu üzerinde metalik Lityum kaplamalar oluşur. Bu esnada katot malzemesi üzerinde Oksidasyon başlar, stabilizasyon azalır ve Karbondioksit (CO_2) üretilir. Hücre içi basıncın artmasına neden olan bu durum hücrede şişme, ergime, yanma veya patlamaya neden olabilmektedir.

Diğer taraftan, Li-ion hücreler aşırı deşarja ya da düşük voltaja (OverDischarge/UnderVoltage) maruz kaldıklarında da akım toplayıcı anot bakırına elektrolit ilavesi başlar. Bu durum da hücrenin kendi üzerine deşarj olma oranını arttırır. Eğer hücreler aşırı deşarja maruz kaldıktan sonra tekrar şarj edilirlse elektrolit içerisinde iyice dağılmış bakır iyonları çökelmeye başlar. Bu durum pil kapasitesini önemli oranda düşürür ve hatta pil elektrotlarının kısa devre olmasına bile neden olabilmektedir. Aşırı deşarj batarya hücrelerin ölmesine, batarya sağlığının bozulmasına ve geri dönüşü olmayan kazaların meydana gelmesine neden olabilmektedir. Bu sebeple Lityum tabanlı hücrelerin kullanıldığı batarya paketlerinde yüksek gerilim ve düşük gerilim koruması sistem ömrünü uzatmak ve batarya sağlığını korumak için oldukça önemlidir (Karadeniz, 2017).

Li-ion bataryaların sıcaklık bakımından güvenli çalışma bölgesinin yanı sıra ideal çalışma bölgeleri vardır. Bu limitler dahilinde çalışmayan bir Li-ion hücresi,

bozulma, düşük kapasite, düşük çevirim ömrü ve yüksek maliyete sebebiyet vermektedir. Şekil 2.10'da bu değerin 15°C-35°C arasında olması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 2.10: Li-ion hücreler için önerilen çalışma sıcaklık aralığı

Kaynak: (Pesaran et al, 2013)

2.3.5 Li-ion bataryaların uygulamaları

Li-ion piller ilk olarak cep telefonları, kameralar, oyun konsolları ve yüzlerce başka elektronik cihaz için ayrıca dizüstü bilgisayarlar gibi tüketici elektroniği ürünlerinde kullanılmıştır. Elektrikli araçlar, şarj edilebilir enerji depoları, bisikletler, scooterlar, elektrikli aletler, forkliftler, vinçler ve diğer endüstriyel ekipmanlar için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Horiba 2014).

2.3.5.1 Kullanıcı Elektroniği Uygulamaları

Li-ion piller, kişisel dijital elektronik merkezi olarak kabul ediliyor (Deng 2015). Li-ion piller ilk olarak cep telefonu uygulamalarında kullanılmış, bunu video kameralar, dizüstü bilgisayarlar ve diğer tüketici elektroniği aletleriyle devam etmiştir (Brodd 2009). Li-ion pillerin performansı için en önemli gereklilik, bu tür taşınabilir elektronik cihazlarda mümkün olduğu kadar uzun süre çalıştırılacak enerji yoğunluğudur. Yüksek oranlı deşarj kapasitesi ve döngü ömrü gereksinimleri üç ya da beş yıllık bir ömür yeterli olur (Horiba 2014). Li-ion piller, büyük ölçüde bu pil kimyasının yüksek enerji yoğunluğu için tercih sebebi olmaktadır. Lityum piller, aynı seviyede enerji tutarken diğer pil türlerinden daha hafif ve daha küçük olabilir.

Bundan dolayı insanlar küçük, taşınabilir ve kablosuz ürünleri hızlı bir şekilde benimsemiştir.

Li-ion piller, cep telefonlarında ve dizüstü bilgisayarlarda en yaygın kullanıldığı alandır. Li-ion pillerin ticarileştirilmesiyle günlük yaşamda fark edilebileceği gibi, mobil elektroniğin işlevlerinin artmasıyla her zaman daha iyi performanslı Li-ion pilleri talep ediliyor. Mevcut telefonun artan işlevlerini kullanırken o telefonu daha az şarj etmek kişinin yaşam kalitesini artırarak zamandan da tasarruf etmesini sağlayacaktır (Deng 2015). Li-ion bataryaların bazı kullanıcı elektroniği uygulamalarda kullanımı için örnekler şekilde verilmiştir (Mo et al, 2017).



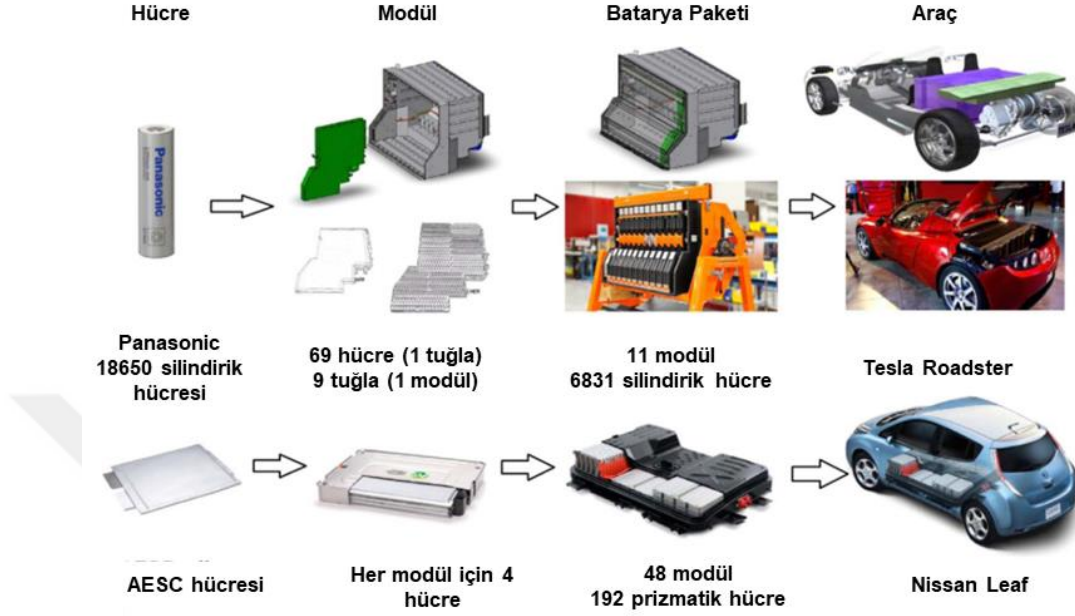
Şekil 2.11: Kullanıcı elektroniğinde Li-ion bataryalarının kullanımı

Kaynak: (Mo et al, 2017)

2.3.5.2 Elektrikli araçlar uygulamaları

Otomotiv sektörü, araca çok ağırlık eklemekten aynı zamanda da elektrikli araçların ihtiyaçlarını karşılayacak yüksek özgül güç ve yüksek özgül enerji yoğunluklu piller isteniyor (Nelson 2002). Elektrikli araçlarda güç yerine enerji önem kazanmıştır. Enerjiyi de aracın pili sayesinde depolayacaktır ve bunun dışında enerji depolayacak başka bir bölüm yoktur. Bu nedenle, araçta kullanılacak pillerin hücre boyutu ve tasarımı bir EV (Electric Vehicle) için en önemli kısımdır (Thackeray et al, 2012). Elektrikli ve hibrid araçlarda kullanılacak pil takımının boyutlandırılması ve kontrol edilmesi için hassas bir görüntüleme esastır. Böyle bir modelin Pil Yönetim Sistemi içerisinde uygulanması, pil takımının her durum, davranışını değerlendirmeyi ve doğru bir kontrol stratejisi uygulamayı mümkün kılmaktadır (Baronti et al, 2010). Örneğin, tamamen elektrikli BMWi3'te kullanılan akülerinin toplam kütlesi 200 kg'ın üzerindedir, bu da toplam boş araç ağırlığının %17'sidir.

Farklı bir örnek olarak, Tesla S için akü sistemi 540 kg ve toplam boş araç kütlesinin %25'i ağırlığındadır (Omar et al, 2017). Bazı elektrikli araçların batarya paketleri aşağıdaki şekilde (2.12) verilmiştir.



Şekil 2.12: Nissan ve Tesla markalı araçların batarya paketleri

Kaynak: (Wang et al, 2016)

Lityum iyon piller, kurşun-asit pillerden dört ila beş kat daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir, bu da onları daha uzun menzil ve yüksek döngü ömrü sağlayan elektrikli scooterlar, bisikletler, araçlar için uygun hale getirir. Bu tarz hafif elektrikli araçlara örnek olarak elektrikli bisiklet kullanımı hızla ortaya çıkan, yeni bir ulaşım hizmeti modelidir. Elektrikli bisikletler eş zamanlı olarak dünyanın birçok bölgesinde yaygınlaşmıştır ve elektrikli bisikletlerin mevcut geleneksel bisikletlere kıyasla daha yüksek düzeyde verimlilik sağlayabileceğini söylemişlerdir. E-bisikleti tercih edilebilir yapan şey ise, kullanıcı dostu ve ekonomik olmasıdır. Pedal destekli elektrikli bisikletler, sürücü pedal çevirmesiyle hareketi sağlar bataryadan sağlanan güçle de sürücüye yardımcı olur. Bu, bisikletin menzilin verimli bir şekilde artırır ve özellikle engebeli arazide sürücünün yorulmasını azaltarak, iyi bir performans sağlar. Bu avantajlar, elektrikli bisikletleri, geleneksel bisikletlerden daha tercih edilir hale getirir. Cherry ve arkadaşlarının yazdığı bu makale, batarya ile çalışarak motora enerji sağlayan elektrikli bisiklet hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir. Bisikleti çalıştırmak için kullanılan elektrik gücü, geleneksel bisiklete göre daha iyi menzil, daha iyi performans sağlar. Enerji tasarruflu olduğu için elektrikli bisiklet herkes için

daha ucuz ve ekonomiktir. Her yaştan insan tarafından kısa mesafeler için kullanılabilir. Elektrikli bisikletler fosil yakıt tüketmemektedir bu sayede çevre dostu ve gürültüsüzdür. Çevre kirliliğini azaltmak ve sağlıklı bir yaşam için tercih edilmesi en yüksek seçenektir. Elektrikli bisikletler, elektrikli iki ila dört tekerlekli Scooter, elektrikli arabalar ve hibrid elektrikli araçlar gibi elektrikli araç uygulamaları için bir Li-ion pil sistemi, işlevselliği yüksek bir güvenlik devresi tasarımına sahip iyi tasarlanmış bir termal yönetim sistemi gerektirir. Zappy elektrikli Scooter'da kullanılan kurşun-asit kimyali pili, Li-ion kimyali pil ile değiştirilmesi önerilmiştir. Bu makalede Bir elektrikli Scooterin PCM içeren Li-ion batarya paketinin ayrıntılı tasarım prosedürü gösterilerek, Li-ion pil modülünün termal tepkisi Alüminyum kanatlar da eklenerek değerlendirilmiştir. Hafif elektrikli araçlara bazı örnekler şekilde sunulmuştur (Al Hallaj et al, 1999; Cherry et al, 2010; Khateeb et al, 2004; Hyvönen et al, 2016).



Şekil 2.13: Hafif Elektrikli Araçlar için örnekler

Kaynak: (Hyvönen et al, 2016)

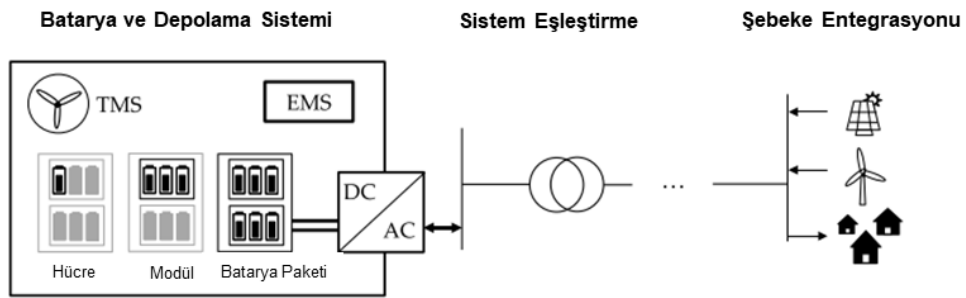
Ağırlık ve boyut drone'larda çok önemli bir kriterdir, bundan dolayı drone'da kullanılan pil ve elektronik parçalar hafif ve küçük seçilerek tasarlanmalıdırlar. Li-Polimer piller boyutlarına göre yüksek enerji yoğunluğuna ve yüksek voltaja sahip oldukları için drone için gerekli olan şartları sağlamaktadır. Yavaş boşalım özellikleri sayesinde kullanılmadıkları zamanlarda self deşarj oranı düşüktür ve uzun süre şarj tutabilme kabiliyetleri vardır (Carloni et al, 2020).

2.3.5.3 Enerji depolama uygulamaları

Enerji depolama sistemlerinin kapsamı, daha küçük ölçekli evsel enerji depolama, büyük ölçekli rüzgar türbinleri veya fotovoltaiik sistemlere kadar kapsamı vardır. Bu şekilde pil grupları geniş bir alana dağılır. Sistemin hatasız, güvenli ve uzun süre çalışması için birçok hücrenin doğru bir şekilde uyumlu olarak çalışması gerekir. Büyük pil grupları, çok sayıda orta boyutlu pili bir araya getirerek oluşturulur.

Yapılan bütün sistemlerin boyut problemlerini çözmek için geniş ve büyük pil üretirmek doğru değildir enerji depolama uygulamalarında kontrol sistemleri diğer uygulama alanlarına göre tüketici elektroniği ya da daha küçük uygulamalar çok daha önemlidir.

Lityum iyon piller, tüketiciler için minimum maliyetle enerji depolama görevi yapar. Büyük ölçekli uygulamalar olan şebeke düzeyinde enerji depolama sistemlerinde lityum iyon piller, yenilebilir enerji kaynaklarıyla birlikte çalışarak ideal bir iş ortaya çıkarır. Enerji depolama uygulamalarında, büyük ölçekli enerji dağıtım uygulamaları ve güç şebekesi alanındaki gereksinimleri karşılamak için pil grupları kullanmak sistemi basitleştirip, kontrolünü kolaylaştırır. Bu nedenle, kullanım ömrü, kapasite, güç, enerji verimliliği ve enerji yoğunlukları gibi enerji depolama uygulamaları gereksinimleri göz önünde bulundurulmalıdır. (Hesse et al, 2017; Chen et al, 2020). Enerji depolama uygulamaları için örnek sistem aşağıda (Şekil 2.14) sunulmuştur.



Şekil 2.14: Enerji depolama uygulamaları

Kaynak: (Hesse et al, 2017).

Bir şalt uygulamasındaki bir yük profili, yedekleme dizisinin sonunda kesicilerin etkinleştirildiği 125V DC’de bir depolamadır. Sistem ne kadar yüksek yük farkına maruz kalırsa o kadar fayda gösterir. Bu sistemlerde, kurşun asit batarya kullanılsaydı batarya boyutu çok büyümüş olacaktı. Aynı kapasiteye sahip birçok hücreden seri paralel yapılarak pil grubu oluşturulur ve bu sistem gereksinimlerine göre yapılır. Buna rağmen yapılan Li-ion batarya grubu, kurşun asit bataryalara kapladığı alan ve ağırlığa göre çok daha verimlidir (Lavoie et al, 2017).

2.3.5.4 Endüstriyel uygulamalar

Endüstriyel alandaki Li-ion pil üreticileri, pazarlarını telekomünikasyon sistemleri, elektrik hizmetleri, demiryolları, madencilik ve diğer ticari araçlar dahil olmak üzere

tahrik gücü uygulamalarında oluşturmaktadır (Saxman 2007). Robotik uygulamalarda Li-ion piller önemli tercihler arasındadır. Yapılan bir çalışmada robotik kolun bir parçası olan Tutucu (Gripper) hareketinin sağlanması yalnızca iki Li-ion pille robotik kavrayıcıları çalıştırabileceği gösterilmiştir. Ayrıca önerilen mekanizmanın ölçeklenebilir olduğu gösterilerek, aktüatöre yalnızca iki lityum iyon pille güç sağlanabileceği noktaya kadar güç tüketimi azaltılabilir. Gücün olmadığı yerlerde bu bağılıktan kurtularak birçok uygulamada kullanılabilir (Mirvakili et al, 2020). İlgili alanda örnek uygulama Şekil 2.15’de verilmiştir.



Şekil 2.15: Endüstriyel alandaki örnek uygulama

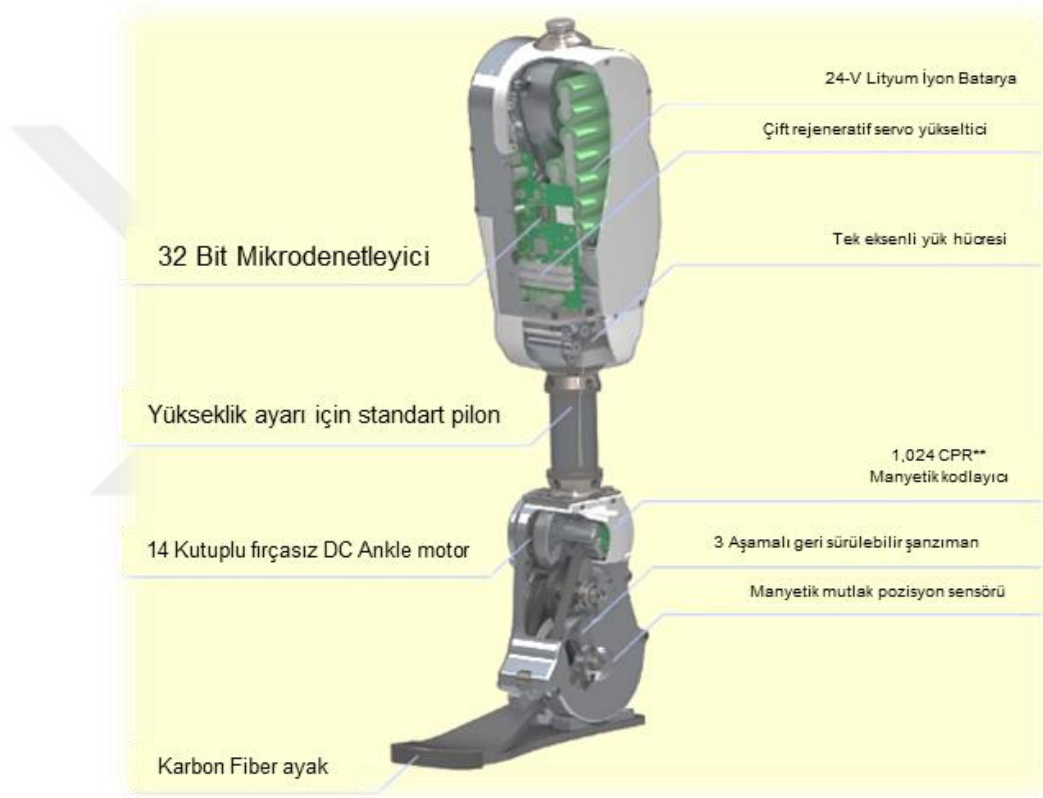
Kaynak: (De Chiffre et al, 2014)

2.3.5.5 Medikal uygulamalar

Lityum iyon pillerin yüksek enerji yoğunluğu ve voltajıyla çoğu durumlarda tıbbi cihazlar için kullanım alanı sağlayan bir teknolojidir. Yüksek kalite ve güvenilirlikte olan lityum iyon piller vücuda yerleştirilebilir tıbbi cihazlar için tasarlanabilir ve üretilir. Çeşitli silindirik ve prizmatik hücrelerin güvenlik testleri, hem elektriksel hem de mekanik davranışa olarak maruz kalarak gerçekleştirilir. Lityum iyon sisteminin güvenliği ve performansı, bu cihazlarda kullanılması için doğru bir seçimdir. Tıbbi cihazlar için kullanılacak Li-ion pillerin bir çok gereksinimi karşılaması gerekmektedir. Dokümantasyon ve cihaz geçmişi kayıtları korunmalı ve ileride bakılabilme ihtimali için arşivlenmelidir. Diğer sektörlerden farklı olarak implante edilebilir tıbbi cihazlar, üretimlerinde kullanılan tüm malzemeler ve

süreçleri izlenebilir olmalıdır. Bireysel seri numaraları içermelidir. Hücreler, sevkiyat öncesinde ve montaj sırasında detaylı denetimden geçmelidir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde etkili bir güç kaynağı olan lityum iyon şarj edilebilir piller, güvenli olarak uygulamalarda yer alabilir aynı zamanda gelecek nesil tıbbi cihazlar için kullanılabilir (Spillman et al, 2008). Örnek bir çalışmada, elektrikli diz ve ayak bileği protezinin tasarımını ve kontrolünü anlatmaktadır. Bu özelliklerde li-ion pil kullanılmıştır (Şekil 2.16). Güç kaynağı, nominal 24V'luk bir Lityum-iyon pil takımıdır (Lawson et al, 2014).



Şekil 2.16: Li-ion bataryası kullanılan bir ayak bileği protezi

Kaynak: (Lawson et al, 2014)

2.4 Karşılaştırma

Günümüzde en yaygın kullanılan batarya kimyalarının karşılaştırması Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Batarya kimyalarının karşılaştırması

Hücre Adı	Nominal Voltaj (V)	Özgül Enerji (Wh/Kg)	Çevirim Ömrü	Şarj Süresi (saat)	Öz Boşalım (%/Aylık)
Kurşun Asit	2	25-40	200-700	8	5
Ni-Cd	1.2	45-80	500-2000	1	20
Ni-MH	1.2	60-120	500-1000	1	30
Li-ion	3.6	110-180	+1000	2-3	10

Kaynak: (Liu et al, 2017)

Li-ion hücrelerinin diğer ticari hücreler ile karşılaştırdığımızda en büyük avantajları yüksek hücre voltajı ve enerji yoğunluğu, düşük öz boşalım oranı ve şarj/deşarj oranı açısından verimli olmasıdır. Bunun için en yaygın pil kimyası potansiyelini taşımaktadır. En belirgin dezavantajları ise, yüksek fiyatı ve batarya yönetim sistemine gerek duymasıdır (Soloveichik 2011). Ayrıca, Li-ion pillerin ticarileşmesinde hala en büyük endişelerden biri bataryanın verimli bir şekilde sıcaklık yönetiminin yapılması ve ısıl güvenliğinin sağlanmasıdır (Khateeb et al, 2004; Soloveichik, 2011; Uchida et al, 2003; Selman et al, 2001; Qin et al, 2019; Sun et al, 2019). Bu nedenle, Li-ion hücreleri, avantajlarıyla birçok uygulamada yer bulsa da dezavantajlarının minimize edilmesi gerekmektedir. Halihazırda Li-ion bataryalar için literatürdeki çalışmalar batarya yönetim sistemleri ve batarya termal yönetim sistemleri ağırlıklıdır. Bu alanlardaki çalışmaların amacı bu bataryaları mekatronik yöntemler ile daha verimli ve güvenli hale getirmektir. Bu çalışmada batarya termal yönetim sistemlerine odaklanacak olsa da bataryanın elektronik bakımından yönetilmesi, diğer fonksiyonlarının takibi ve Li-ion batarya paketlerinin unsurlarının incelenmesi konusunda bağımsızlık oluşturamamaktadır. Bu sebeple analog ve dijital batarya yönetim sistemine araştırması da yapıp çalışmada ön bilgi olarak kısaca yer verilmiştir.

2.5 Batarya Yönetim Sistemleri

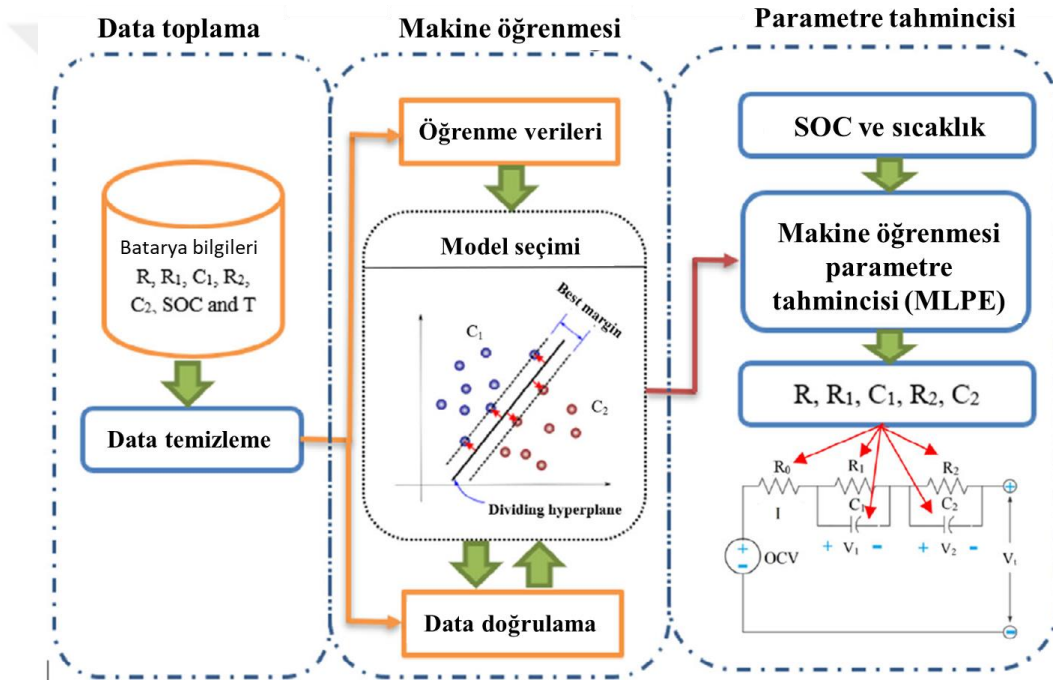
Batarya yönetim sistemi (BMS) bir veya daha çok hücreden oluşan batarya paketlerinin şarj vedeşarj sırasında denetimini ve yönetimini yapan sistemlerdir. BMS'in amacı bataryanın verimini ve ömrünü artırmaktır. Batarya parametrelerinin kontrolü oldukça önemlidir. Batarya parametreleri olan gerilim, akım, sıcaklık gibi verilerin herhangi bir istenilmeyen duruma karşı anlık olarak okunup, görüntülenmesi gerekir. Şarj vedeşarj işlemleri esnasında bu parametreler takip

edilerek önemli olan durumlarda sistemin uyarı vermesi beklenir. Aşırı şarj olma, zamansız deşarj olma, yüksek akım, yüksek sıcaklık gibi durumlarda gerekli işlemleri yaparak bataryayı korur. BMS gerilim, akım ve sıcaklık verilerinden okuduğu değerlere göre batarya paketindeki kalan enerjiyi hesaplayabilir. Bunun sonucunda ise batarya paketinin kullanabileceği süreyi tahmin edebilir. Ayrıca, şarj işlemi esnasında bataryada depolanan enerjiyi hesaplayarak batarya ömrünü tahmin edebilir (Kılıç 2016). BMS'in fonksiyonları aşağıdaki gibidir;

- Güvenlik
 - Aşırı Şarj
 - Aşırı deşarj
 - Yüksek sıcaklık
 - Yüksek şarj akımı
 - Kısa devre
- İstenmeyen Durumların Telafisi
 - Hücre gerilim dengesizliklerinin giderilmesi
 - Acil durumlarda kapatma
- Ölçme ve görüntüleme
(Veri Görüntüleme)
 - Hücre gerilimleri
 - Toplam gerilim
 - Toplam akım
 - Hücre sıcaklıkları
- Haberleşme (Veri Aktarımı)
 - Şarj durumu
 - Sağlık durumu
 - Hücre sıcaklıkları
 - Aşırı şarj-deşarj
- Veri işleme
 - Şarj durumu tahmini (SOC)
 - Sağlık durumu tahmini (SOH)

Her ne kadar BMS'in en temel görevi güvenlik olsa da şarj durumu kestirimi (State Of Charge – SOC) ve sağlık durumu kestirimi (State Of Health) de bir o kadar

önemlidir. SOC ve SOH kestirimi için akım sayma, iç direnç takibi, gerilim ölçümü, OCV ölçümü vb. yöntem uygulanmaktadır. Özellikle elektrikli araçlar uygulamalarında en yaygın kullanılan yöntem tahmine dayalı yöntemlerdir. Bu yöntemde Li-ion bataryanın bilgisayar ortamında eşdeğer devreleri belirlenip modellenmesi yapılmaktadır. Daha sonra Kalman filtresi gibi filtreler entegre edilerek %1'in altında bir hata payıyla bataryanın durumu tahmin edilmektedir. Günümüzde bu alanda akademik olarak yenilikçi çalışmalar devam etmektedir. Örneğin Hashemi ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada (Şekil 2.17), makine öğrenmesiyle batarya modellemesinin parametrelerini tahmin ederek inovatif bir çalışma yapılmıştır (Hashemi et al, 2021).



Şekil 2.17: Makine öğrenmesi parametre tahmincisi (MLPE) yöntemiyle batarya modelleme mimarisi

Kaynak: (Hashemi et al, 2021)

2.6 Batarya Termal Yönetim Sistemleri

Battery Thermal Management System (BTMS) veya Batarya Yönetim Sistemi ikincil bataryalar için özellikle Li-ion batarya paketlerinin sıcaklık artışından patlama riskini azaltılması ve batarya performans ve verimliliğinin azalmasının engelleme amaçlı kullanılmaktadır. Birçok çalışmada bataryanın termal karakteristiğini ve bunun performansa nasıl bir etkisi olacağı araştırılıp tespit edilmiştir. Her hücrelerin çalışma aralığı -20°C ile $+60^{\circ}\text{C}$ arası olsa da (Väyrynen et al, 2012), bu çalışmalarda

BTMS'lerin, Li-ion batarya paketlerinin sıcaklığını 15°C-35°C arasında tutması gerektiğini belirtmiştir (Pesaran et al, 2013; Ye et al, 2015). Ayrıca, bu pillerin olması gereken sıcaklığın üzerindeki her 13°C derecelik ısınmada pil ömrünün yarıya düşmesi bilgisi tespit edilmiştir (Keyser et al, 2017). Bir başka çalışmada ise, hücre sıcaklığı sınırı aştığında termal sızıntısının tetikleneceğini ve bunun da korkunç bir felakete yol açabileceğini göstermiştir (Sun et al, 2016). Birçok araştırmada, hücrelerin dengesizliğine yol açabilen hücreler ve modüller arası sıcaklık farkı 5°C 'den az olması gerektiğini aksi takdirde performans kaybı yaşanacağı belirtmiştir (Liu et al, 2017; Xia et al, 2017; Chiu et al, 2014). Ayrıca, daha yüksek sıcaklıkta çalışan hücreler, karşılaştırıldığında her döngüden sonra daha yüksek kapasite kaybına sahip olacakları bilinmektedir (Ramadass et al, 2002). Çizelge 2.3'de bazı hücrelerin sıcaklık değişimine göre kapasite kaybı miktarı verilmiştir.

Çizelge 2.3: Hücrelere göre kapasite kaybı miktarı

Hücre / Materyal	Deşarj Aralığı	C Değeri	Çevirim Sayısı	Çevirim Sıcaklığı/ °C	Kapasite Kaybı
C / LiFePO ₄	3.6~2.0 V	3CC/1	600	45	25.6%
				25	14.3%
				0	15.5%
				-10	20.3%
C / LiFePO ₄	90.0% DOD	C/2	757 2628	60	20.1%
				15	7.5%
				55	70.0%
(MCMB) / LiFePO ₄	3.8~2.7 V	C/3	100	37	40.0%
				25	Düşük
				60	65.0%
C / Li [Ni _{0.8} Co _{0.15} Al _{0.05}]O ₂	100.0% DOD	C/2	140	25	4.0%
				55	26.7%
				25	10.1%

Kaynak: (Liu et al, 2020)

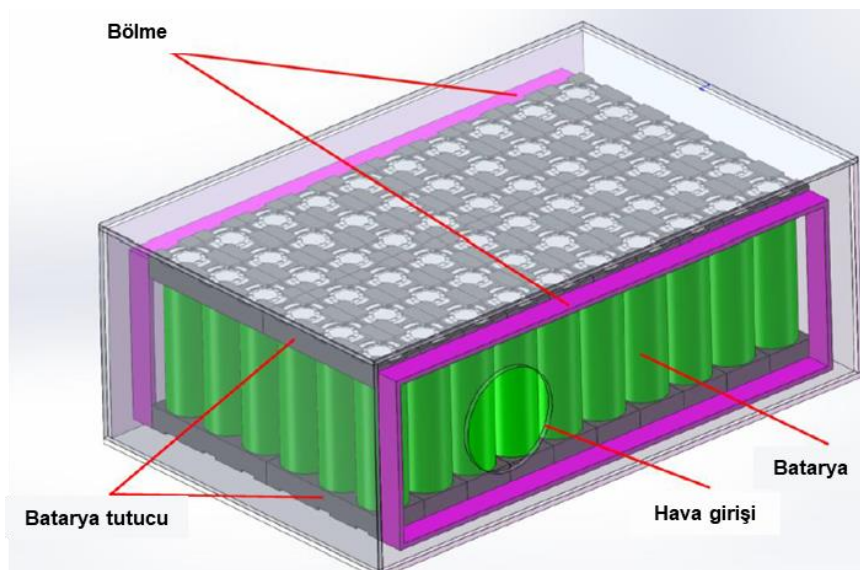
Uygun olmayan batarya sıcaklığının pillerin performansı, ömrü ve güvenliği üzerinde olumsuz bir etkisi olacaktır. Bu nedenle, her pil sistemi için bir BTMS gereklidir. Bir BTMS'in birincil görevi, pilleri uygun sıcaklık aralığında tutmak ve pil paketinde eşit bir sıcaklık dağılımı sağlamaktır. Daha sonra, pil paketlerinin uygulanmasına bağlı olarak ağırlık, boyut, güvenilirlik ve maliyet gibi diğer faktörler de dikkate alınmalıdır. Bu kapsamda, silindirik hücre yapılarında kullanılan BTMS (ısıtma ve soğutma) yöntemleri kısaca açıklayıp karşılaştırarak uygun bir yöntem sunulacaktır.

2.6.1 Soğutma Sistemleri

2.6.1.1 Hava soğutmalı sistemleri

Hava, soğutma için en eski ve geleneksel yöntem olup çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük ısı kapasitesi ve düşük ısıl iletkenlik nedeniyle hava, iyi bir soğutma ortamı gibi görünmeyebilir. Ancak, karmaşık olmaması ve düşük maliyeti nedeniyle yine de bazı uygulamalarda iyi bir çözümdür (Liu et al, 2017). Soğutma, doğal konveksiyon (Pasif) ve örneğin bir fan tarafından zorlamalı konveksiyon (Aktif) kullanılarak yapılabilir. Pasif sistemler büyük batarya paketleri için uygun olmayıp tipik olarak konveksiyon katsayısını artırmak için fanlar kullanılır (Xia et al, 2017).

Seri olarak düzenlenmiş bir pil setini soğutmak için hava kullanıldığında, düşük ısı kapasitesi nedeniyle sıcaklığı önemli ölçüde artar. Bu, paket çıkışında daha yüksek hücre sıcaklıklarına yol açar ve eşit olmayan bir sıcaklık dağılımı oluşturur. Bu nedenle, soğutma sıvısı ortam hızını artırmak, akışta hava burgacı oluşturmak ve her hücrenin konumlandırmasını optimize etmek gibi tekdüzelik sağlamak için ekstra önlemler almak önemlidir. Son gelişmelere bakıldığında, Jiaqiang ve arkadaşları (Jiaqiang et al, 2018), farklı Li-ion silindirik hücre kare şeklinde yan yana düzenlerinde ve fanın konumlandırılmasına incelemiştir (Şekil 2.18). Fan modülün yan tarafına yerleştirilip hava çıkışının modülün karşı tarafta çapraz bir şekilde konumlandığında en iyi soğutma performansının elde edildiğini tespit etmiştir.



Şekil 2.18: Jiaqiang ve arkadaşlarının model önerileri (Hava soğutmalı)

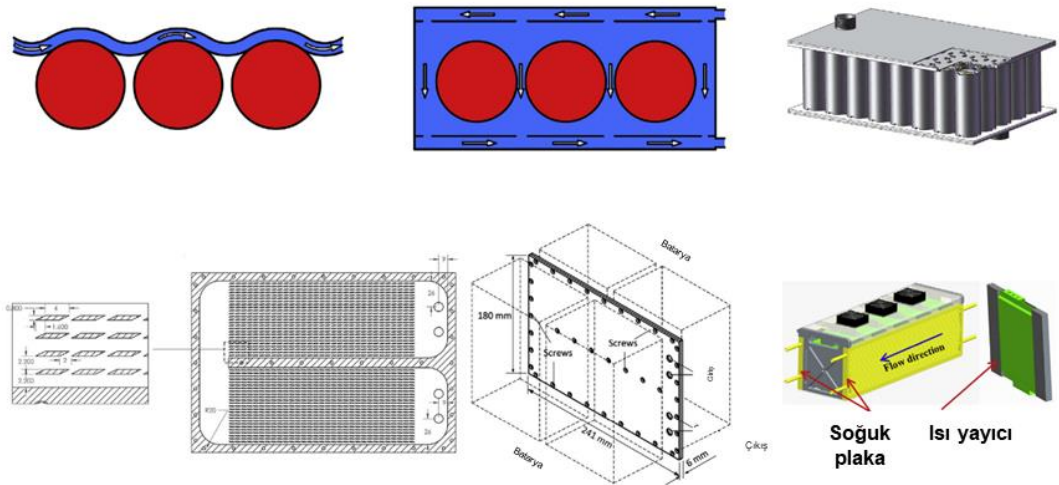
Kaynak: (Jiaqiang et al, 2018)

Hava soğutma sistemleri maliyet, karmaşıklık, bakım ve ağırlık gibi birçok açıdan avantajlara sahiptir. Ancak, yüksek ortam sıcaklığı olduğunda ve/veya yüksek deşarj oranı gerektiren uygulamalar için uygun görülmemektedir (Liu et al, 2017).

2.6.1.2 Sıvı soğutmalı sistemleri

Sıvı soğutucular, havaya kıyasla çeşitli avantajlara sahiptir. Sıvı soğutma, soğutma kapasitesinden ödün vermeden havadan daha kompakttır. Sıvı soğutucular, daha yüksek yoğunluk ve ısı kapasitesi nedeniyle havadan 3500 kat daha verimli olabilir. Hava soğutmaya kıyasla %40'a kadar güç tasarrufu sağlayabilirler. Ek olarak, sıvı soğutma gürültü seviyesini azaltabilir. Bununla birlikte, sıvıların maliyet, karmaşıklık ve sızıntı potansiyeli gibi dezavantajları da vardır.

Sıvı soğutma sistemleri dolaylı ve doğrudan olarak iki yöntemle ayrılır. Şekil 2.19'da örnek dolaylı sıvı soğutma sistemleri sunulmuştur (Xia et al, 2017). Ticari olarak kullanılan bu sistemlerin en iyi örneklerinden biri Tesla'nın araçlarında kullandığı sisteme değinebiliriz (Adams et al, 2009).



Şekil 2.19: Silindirik hücreler için dolaylı sıvı soğutma sistemleri

Kaynak: (Xia et al, 2017)

Doğrudan soğutma sistemi (daldırma sistemi), hücrenin tüm yüzeyini kaplar ve onu eşit şekilde soğutur. Hücredeki istenmeyen sıcak/soğuk noktaları azaltarak performansını artırır. Doğrudan soğutma için soğutucu maddenin, düşük viskozite, yüksek termal iletkenlik ve termal kapasiteye sahip bir yalıtkan olmalıdır. Xing firmasının ürünü (Şekil 2.20) bu yöntem ile çalışıp ticarileşen iyi örneklerinden biridir [65].



Şekil 2.20: Xing batarya modülü

Kaynak: (XING Mobility Inc, 2017)

Sonuç olarak, sıvı soğutmalı sistemler bazı hızlı şarj koşullarında özellikle elektrikli araçlarda başarılı bir sistem sayıla bilmektedir. Ancak, hava soğutmaya göre daha fazla ağırlık ekleyebilmesine ve karmaşıklığını artırmaktadır. Ayrıca, soğutma sıvısının sızıntısı da muhtemel problemlerden biri olarak sayılmaktadır (Liu 2017).

2.6.1.3 Faz değişim malzeme soğutma sistemleri

Sıvı ve hava soğutma sistemlerinin yanı sıra diğer bir alternatif yöntem olan ve Faz Değişim Malzeme veya Phase Change Material (PCM) olarak bilinen yöntem, ilk kez 2000 yılında, Hallaj ve Selman (Al Hallaj et al, 2000) tarafından geliştirilmiştir. Buradaki Faz değişiminden kasıt, katı fazdan sıvı fazına dönüştürmektir.

PCM yüksek gizli ısıya sahip olup pilin deşarjı sırasında bir soğutucu görevi görür. Hücreler bekleme madundayken PCM, hücrelere ve ortama sıcaklığını yayar. Li-ion bataryaları için kullanılan PCM'ler, bu hücrelere uyan bir erime noktasına sahipler ve böylece hücre sıcaklığı uzun süre doğru sıcaklıkta tutabilirler.

Pasif bir soğutma yöntemi olarak sınıflandırılan PCM termal yönetim sistemi, basitlik, hafiflik, yüksek verimlilik ve fanlar gibi ekstra bileşenlere ihtiyaç duyulmaması gibi birçok avantaja sahiptir. Sıvı/hava sistemleriyle karşılaştırıldığında, katı-sıvı faz değiştirme sistemleri daha kompakt ve pratiktir, bu da onları araç uygulamalarında uygun kılmaktadır. Bu nedenle, PCM soğutması son birkaç yılda büyük ilgi görmüştür (Liu 2017). Son yıllarda ticarileşmiş olan Hallaj'ın da kurucusu olduğu AllCell firmasının ürünü, Şekil 2.21'de sunulmuştur.



Şekil 2.21: Allcell PCM Modülü

Kaynak: (Allcelltech, 2014)

Termal yönetim için uygun bir PCM seçilmesinde aşağıdakiler dikkate alınmalıdır;

- İstenilen sıcaklık aralığı içerisinde erime noktası,
- Yüksek gizli ısı, özgül ısı kapasitesi ve termal iletkenlik,
- Faz değişim sürecinden sonra düşük hacimli genişleme,
- Donarken ihmal edilebilir alt soğutma (sub-cooling) etkisi,
- Kararsız, zehirli, yanıcı, patlayıcı olmayan özellikler,
- Ekonomik olması (Rao et al, 2011).

PCM tabanlı BTMS'lerin geliştirilmesi son yıllarda odak noktası haline gelmiş olup son birkaç yılda kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda en büyük problem ise batarya uzun süre çalışırsa veya ortam sıcaklığı çok yüksekse, PCM tamamen eriyebilir ve düşük ısı iletkenliği nedeniyle termal bariyer görevi görebilir. Diğer taraftan, ortam çok soğuksa, PCM modüllere termal kütle ekleyerek hücrelerin doğru sıcaklığa ulaşmasını zorlaştıracaktır. Ayrıca, PCM sisteminin entegrasyonu hacim, ağırlık ve maliyeti arttıracaktır.

2.6.1.4 Karşılaştırma

Daha önce açıklanmış olan hava soğutma, sıvı soğutma ve PCM soğutma olarak sunulan BTMS soğutma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları Çizelge 2.4'de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 2.4: BTMS Soğutma sistemleri karşılaştırılması

Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Hava Soğutmalı	▪ Ucuz ▪ Uygulaması kolay ▪ Erişebilir ▪ Farklı tip hücrelere uygulanabilirlik ▪ Uzun ömürlü ▪ Isıtma için de kullanılabilirliği ▪ Ticarileşmiş olması	▪ Düşük performans ▪ Büyük alan gereksinimi (Hacimsel) ▪ Gürültü ▪ Düşük verim
Sıvı Soğutmalı	▪ Büyük sıcaklık düşüşü ▪ Dengeli ısı dağılımı ▪ Yüksek verim ▪ Isıtma için de kullanılabilirliği ▪ Farklı tip hücrelere uygulanabilirlik ▪ Ticarileşmiş olması	▪ Sızıntı ihtimalinin olması ▪ Pahalı ▪ Ağır ▪ Kompleks sistem ▪ Bakımının zor olması
PCM (Faz Değişim Malzeme)	▪ Ucuz ▪ Kompakt ▪ Büyük sıcaklık düşüşü ▪ Nispeten dengeli ısı dağılımı ▪ Uzun ömürlü ▪ Yüksek performanslı ▪ Enerji depolama özelliğinin olması	▪ Düşük ısı iletkenliği ▪ Akışkanlık ▪ Erime sonrası potansiyel sıvı sızma ihtimalinin olması ▪ Hacim genişlenmesi ▪ Ağır

Kaynak: (Liu 2017)

Yöntemlerin kıyaslaması yapıldığında, hava soğutma yönteminin avantajlarından düşük maliyet, basitlik ve soğutma sıvısı malzemelerinin erişilebilirliği öne çıkmaktadır. Son yıllarda hava soğutmasındaki gelişmeler, geometrik düzenlerin ve işletim parametrelerinin optimizasyonuna odaklanılmıştır. Sıvı soğutma sistemlerin kullanılması, hava soğutmasının düşük ısı aktarım katsayısına kıyasla termal yönetimin verimliliğini büyük ölçüde arttırabilir. Hava ve sıvı termal yönetiminin ortak sorunu, vanalar, fanlar/pompalar ve soğutma boru veya kanalları gibi ekstra bileşenlerin eklenmesinin BTMS'lerin ağırlığını ve hacmini artırmasıdır.

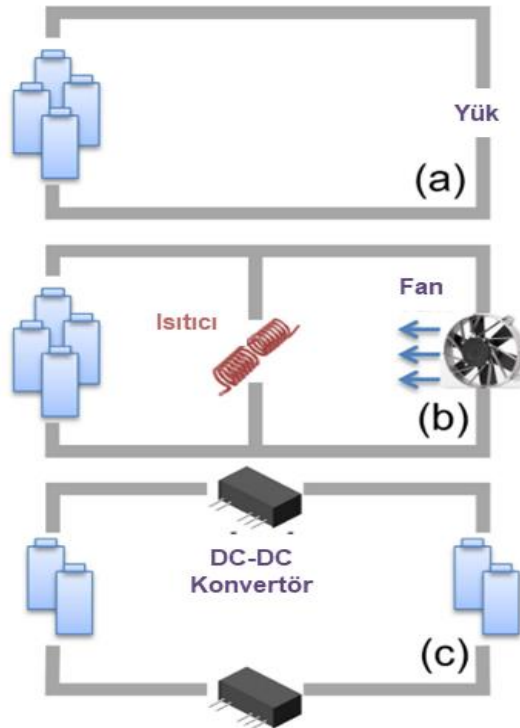
PCM yöntemi, mükemmel bir sıcaklık düşürme ve tekdüzelik performansına sahip diğer termal yönetim stratejileri için umut verici bir alternatif olarak değerlendirilmektedir. Ancak, PCM'lerin zayıf termal iletkenliği bu sistemlerin devam eden dezavantajlarından. Ayrıca, faz değiştiren maddelerin tamamen

erimesinden veya dahası sızdırma ihtimalinden kaynaklanan endişeler de bu dezavantajlara dahildir (Liu 2017).

2.6.2 Isıtma Sistemleri

Li-ion hücrelerin sıcaklığı 15°C altına düştüğünde kapasite, güç ve verimlilik konusunda azalma yaşanır (Pesaran et al, 2013). Bu nedenle, Termal yönetim, pillerin hem soğutulmasını hem de ısıtılmasını içerir. Ancak literatür taramasında ısınma konusunda çok az çalışma yapıldığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi, hücrelerin çalışmasından her zaman doğal ısınmanın olacağından kaynaklanabilir. Diğer taraftan, düşük sıcaklık yalnızca pillerin performansına olumsuz etkisi oluyorken termal kaçak ve bunun sonucunda patlama gibi yıkıcı etkileri vardır. Bununla birlikte, son yıllarda elektrikli araç pazarının genişlemesi ve ürün yelpazesinin önemi ile birlikte, soğuk ortamlar için elektrikli araçların performansını iyileştirmek için farklı BTMS teknolojileri araştırılmaktadır.

Ji ve arkadaşları (Ji et al, 2013) eksi sıcaklıklardan ideal sıcaklığa gelme yöntemlerini incelemiştir (Şekil 2.22). Bu çalışmadaki ısıtma temel yöntemleri aşağıdaki gibidir;



Şekil 2.22: Isıtma yöntemleri (a) kendinden ısıtma, (b) Konvektif ısıtma, (c) Karşılıklı Darbeli Isıtma

Kaynak: (Ji et al, 2013)

- I. **Kendinden Isıtma (Self-Internal Heating):** Düşük sıcaklıklarda, hücrelerin iç direnci daha yükselir ve çalışmaya başladıkça hücrelerin içinde daha fazla ısı üretilir. Böylece pilin kendi ısısının tutulabilmesiyle sıcaklığını korumuş olacaktır.
- II. **Konvektif Isıtma:** Pillerin kendileri bir elektrikli ısıtıcı ve bir fan ile ısınması sağlanır. Fan ve ısıtıcının gücü, bataryanın kendisinden veya harici bir kaynaktan alınır. Konvektif yöntem, pil ısıtmasında en hızlı yöntemdir. Ancak ısıtma sisteminin maliyeti yüksek olup sistemin dayanım ve bakım ömrü bataryaya da olumsuz yansımaktadır.
- III. **Karşılıklı Darbeli Isıtma:** Bu yöntemde piller iki gruba ayrılır. Bir grup, diğer grup pillerini şarj etmek için deşarj ettirilir ve bu işlem, döngü şeklinde tekrarlanır. Bu yöntem, kendinden ısıtma yöntemine göre daha hızlıdır. Konvektif yöntemine göre daha güvenilir olup homojen bir ısıtma sağlar. Bu yöntem, diğer ikisine göre en az pil kapasitesini kullanandır fakat çok karmaşık ve pahalıdır.

Bu yöntemler karşılaştığında en basit ve ekonomik yöntem kendinden ısıtma yöntemi olarak görülmektedir. Ancak bu yöntemin verimli olabilmesi için hücreden çıkan ısıнын ortama sızıp dağılmasını önlemek için iyi bir ısı yalıtımı olması gerekmektedir (Zhang et al, 2017; Wang et al, 2016).

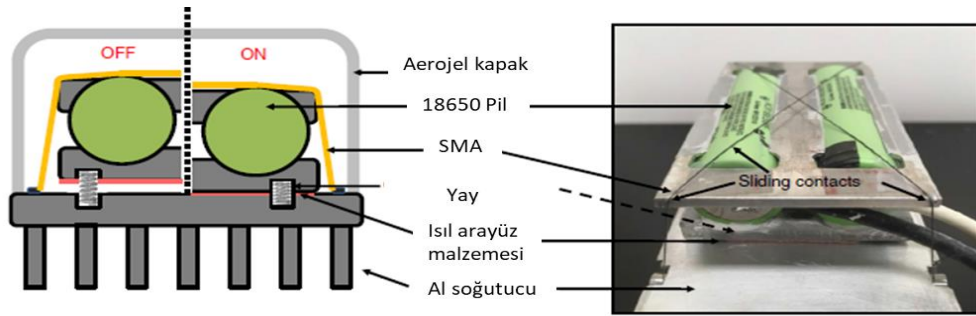
Sonuç olarak ideal bir BTMS, düşük sıcaklıkta ısı yalıtımı ve yüksek sıcaklıkta ısı iletimi gereksinimini taşıması gerekmektedir. Ancak var olan yöntemlerin çoğu buna karşılık verememektedir. Bu sistemlerin birçok uygulama için en mantıklısı olarak görülen sıvı termal yönetim sistemleri, bu yöntemlerin arasında bahsedilen iki ana görevi bir dereceye kadar sağlayabilmiş ise de, sıvının sıcaktan soğuğa veya soğuktan sığa dönüşme hızının kontrastı yeterince büyük değildir (Buford et al, 2011). Ayrıca mobil uygulamalar için gerek fiyat ve herek ağırlık ve karmaşıklığı bakımından uygulanabilir ve ticarileşebilir görülmemektedir. Çalışma kapsamında, bir sonraki bölümde, sıvı, güç kaynağı, elektronik devre içermeyip hem sıcak hem de soğuk ekstrem ortamlarda pil sıcaklığını dengeleyebilen pasif BTMS tasarımları sunulacaktır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 Alüminyum Hibrid Sistem Tasarımı

3.1.1 NiTi şekil hafızalı alaşımlar

Şekil hafızalı alaşım (SMA) ilk olarak 1932 yılında Arne Ölander tarafından keşfedildi (Ölander, 2002). SMA'ler otomotiv (Jani et al, 2014), havacılık, biyomedikal ve robotik başta olmak üzere birçok endüstriyel alanda kullanım alanı bulmuştur (Vasudha et al, 2020; Sapmaz et al, 2021; Dilibal et al, 2015; Altug Peduk et al, 2021; Güllü et al, 2021). Fe-Mn-Si, Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni gibi SMA'ler, kararsızlıkları ve pratik olmamalarından dolayı düşük maliyetli olsalar da zayıf performanslarından dolayı NiTi SMA'ler, termo mekanik performansları sayesinde çoğu uygulama için daha çok tercih edilir (Huang, 2002). SMA'lerin sıcaklıkla şekil değiştirme özelliği, bataryanın termal yönetimini sağlamak amacıyla bu alanda da kendine yer bulmuştur. Nikel-titanyum (NiTi) şekil hafızalı alaşımlar (SMAs), birçok akıllı adaptronik çözümleri için de kullanılmaktadırlar (Dilibal, 2016; Dilibal, 2018; Ades et al, 2020; Lin et al, 2020; Dilibal et al, Sep 2017; Dilibal et al, Oct 2017;). BTMS tasarımında, bu alaşımlar, yenilikçi bir yaklaşımla Hao ve ark. tarafından çalışmalarında sunulmuştur. Bu çalışmada NiTi tel yardımıyla bataryanın kendinden ısıtma modundan pasif hava soğutmalı moduna geçişte kullanılmıştır. Bunun sonucunda Şekil 3.1'de yazarlar tarafından soğutma ve ısıtma işleminde NiTi SMA ile yumuşak geçiş yapabilen pasif bir BTMS önerilmiştir (Hao et al, 2018).



Şekil 3.1: Şekil hafızalı alaşımı regülatör olarak kullanan batarya termal yönetim sistemi çalışması örneği

Kaynak: (Hao et al, 2018)

Bu sistem uygun maliyetli olup anahtarlama modunda geniş kontrast, düşük ağırlık ve hem sıcak hem de soğuk koşullarda çalışmaya uygun özelliklerine sahiptir. Ancak bu çalışmadaki tasarım seri üretim ve özel tasarımı batarya paketlerine uygun değildir.

NiTi modellemesi yapıldıktan sonra yukarıda belirtilen tasarım yaklaşımının eksik yönleri giderilip uygun tasarımlar sunulacaktır.

3.1.2 NiTi model analizi

Bu çalışmada, akıllı BTMS tasarımları için seçilen nikel-titanyum şekil hafızalı alaşım telinin gerilme-sıcaklık davranışı sayısal olarak modellemek için Saleeb ve ark. (Saleeb et al, 2011) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Sayısal analiz için Abaqus büyük ölçekli sonlu elemanlar analizinden (Saleeb et al, 2015) faydalanarak model oluşturulmuştur. NiTi SMA malzemesinin seçim süreci, model sonuçlarından elde edilecektir. Mevcut uygulama ile ilgili olan model denklemleri ve parametrelerin özeti aşağıda verilmiştir.

Birim şekil değiştirme için;

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^l; \quad (3.1)$$

$$\alpha_{ij} = \sum_{b=1}^N \alpha_{ij}^{(b)} \quad (3.2)$$

Depolanan enerji ve yayılma potansiyelleri için özel fonksiyonel formlar;

$$\Phi_R(\sigma_{ij}) = \frac{1}{2} \sigma_{ij} E_{ijkl}^{-1} \sigma_{kl}; \quad (3.3)$$

$$\Phi_{IR}(\sigma_{ij}, \alpha_{ij}^{(b)}) = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}^l + \sum_{b=1}^N \bar{H}_{(b)}, \quad (3.4)$$

$$\Omega((\sigma_{ij} - \alpha_{ij}), \alpha_{ij}^{(b)}) = \int \frac{\kappa^2 F^n}{2\mu} dF, \quad (3.5)$$

$$\dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^l = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \Phi_R}{\partial \sigma_{ij}} \right) = E_{ijkl}^{-1} \dot{\sigma}_{kl}; \quad \dot{\varepsilon}_{ij}^l = \frac{\partial \Omega}{\partial \sigma_{ij}}, \quad (3.6)$$

$$\dot{\alpha}_{kl}^{(b)} = \left[\frac{\partial^2 \Phi_{IR}}{\partial \alpha_{ij}^{(b)} \partial \alpha_{kl}^{(b)}} \right]^{-1} \dot{\gamma}_{ij}^{(b)}; \quad (3.7)$$

$$\dot{\gamma}_{ij}^{(b)} = -\frac{\partial \Omega}{\partial \alpha_{ij}^{(b)}}, \quad (3.8)$$

Burada κ , μ ve n malzeme sabitleridir, F dönüşüm fonksiyonudur ve $\bar{H}_{(b)}$ tokluk fonksiyonudur. E_{ijkl} ise, elastisite modülünün izotropik dördüncü derece tensörüdür.

Dönüşüm ve sertleştirme fonksiyonları;

$$F(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) = \frac{1}{\kappa^2} \left[\frac{1}{2\rho^2} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) M_{ijkl} (\sigma_{kl} - \alpha_{kl}) \right], \quad (3.9)$$

$$\bar{H}_{(b)} = \begin{cases} \kappa_{(b)}^2 \int \frac{1}{\bar{h}(g^{(b)})} dG^{(b)}, \text{for } b = 1, 2, 3; \\ \kappa_{(b)}^2 \int \frac{1}{h(G^{(b)})} dG^{(b)}, \text{for } b \geq 4; \end{cases} \quad (3.10)$$

$$\bar{h}(g^{(b)}) = \begin{cases} \frac{\rho_{(b)} \kappa_{(b)} H_{(b)} \left(\sqrt{g^{(b)}} \right)^{(\beta_{(b)}-1)}}{\kappa_{(b)} + H_{(b)} \left(\sqrt{g^{(b)}} \right)^{\beta_{(b)}}}, \text{for } b = 1, 2, \\ \rho_{(b)} H_{(b)} \left[1 + \left(\frac{\sqrt{g^{(b)}}}{\kappa_{(b)}/H_{(b)}} \right)^{\beta_{(b)}} \right], \text{for } b = 3, \end{cases} \quad (3.11)$$

$$h(G^{(b)}) = H_{(b)} \left[1 - \left(\frac{\sqrt{G^{(b)}}}{\rho_{(b)}} \right)^{\beta_{(b)}} \hat{h}(L) \right], \text{for } b \geq 4; \quad (3.12)$$

Burada,

$$G^{(b)}(\alpha_{ij}^{(b)}) = \frac{1}{2\kappa_{(b)}^2} (\alpha_{ij}^{(b)} M_{ijkl} \alpha_{kl}^{(b)}); \quad (3.13)$$

$$g^{(b)}(\gamma_{ij}^{(b)}) = \gamma_{ij}^{(b)} \gamma_{ij}^{(b)}; \quad (3.14)$$

$$\rho = \frac{1+c\sqrt{d}}{1+c\sqrt{d}+k_3}; \rho_{(b)} = 1 \quad (3.15)$$

$k_3 = \cos 3\theta$ denklemindeki θ is Lode açısı of gerilme farkından elde edilmektedir $(\sigma_{ij} - \alpha_{ij})$.

$\hat{h}(L)$ = Heaviside fonksiyonu bağımsız değişken yükleme indeksi ile $L = \alpha_{ij}^{(b)} \Gamma_{ij}$ dir;

Bu durumda, $\Gamma_{ij} = \frac{\partial F}{\partial (\sigma_{ij} - \alpha_{ij})}$.

$$M_{ijkl} = \frac{1}{2} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \delta_{kl}; \quad (3.16)$$

Burada δ_{ij} = Kronecker delta.

$H_{(b)}$, $\beta_{(b)}$, ve $\kappa_{(b)}$ = tokluk ve sertlik mekanizması için malzeme parametreleridir.

c , d = Sıcaklığa bağlı asimetric şekil değiştirme hesaplaması için malzeme parametreleridir.

Yüksek sıcaklıklarda (östenit faz) psödoelastik tepkileri, daha düşük sıcaklıklarda (martensit faz) psödoplastik tepkileri ve izobarik (sabit gerilme) termomekanik döngüleri yakalamak için model parametreleri şu şekilde gruplandırılmıştır:

I. Sabit parametreler

II. Sıcaklığa bağlı parametreler

Seçilen NiTi alaşımı için sadece eşik parametreleri, mekanizma için $\kappa_{(b)}$ de, $b = 1, 2$ ve 4 sıcaklığa bağımlı hale getirilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda büyük bir $\kappa_{(1)}$ ve $\kappa_{(2)}$ değeri, modelin yüksek sıcaklık seviyelerinde NiTi alaşımının psödoelastik davranışlarını yakalamasını sağlar. Tam tersine, $T < 20$ °C'de çok önemsiz $\kappa_{(1)}$ ile nispeten yüksek $\kappa_{(4)}$ değerleri (sabit $\kappa_{(5)}$ ve $\kappa_{(6)}$ değerlerine ek olarak) modelin psödoplastik davranışının tahmin edilmesini sağlamaktadır. Sabit parametreler ise, Young modülü, E , Poisson oranı, ν , eşik terimleri, κ ve mekanizma için $\kappa_{(b)}$, $b = 3, 5$ ve 6, sertlik oranı parametreleri ve $H_{(b)}$, ve $\beta_{(b)}$ altı mekanizma içindir.

Çizelge 3.1: Sabit parametreler

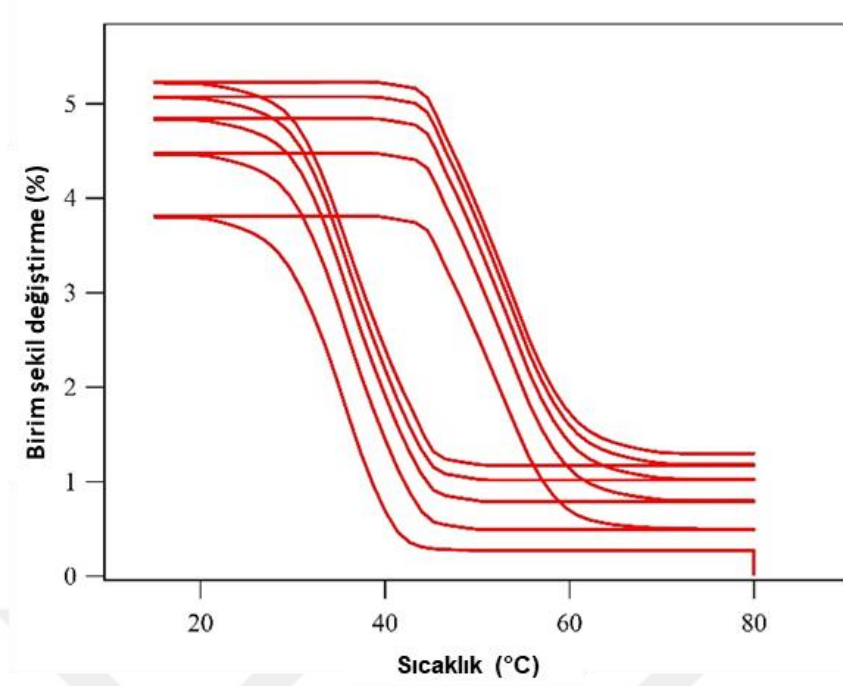
Parametre	Birim	Değer
Elastik Sabitler		
Elastisite modülü, E	GPa	60
Poisson oranı, ν	-	0.3
Elastik Olmayan Sabitler		
Mekanizma sayısı	-	6
n	-	5
μ	MPa.s	1×10^5
κ	MPa	20
$\kappa_{(b)}$, b=3	MPa	1E21
$\kappa_{(b)}$, b=5	MPa	50
$\kappa_{(b)}$, b=6	MPa	72
$\beta_{(b)}$, b=1-6	-	1, 1, 10, 10, 1, 2.5
H _(b) , b=1-3	MPa	300×10^3 , 300×10^3 , 200
H _(b) , b=4-6	MPa	45×10^3 , 2×10^3 , 600

Sıcaklığa bağlı parametreler ise Çizelge 3.2 verilmiştir.

Çizelge 3.2: Sıcaklığa bağlı parametreler

Sıcaklık (°C)	$\kappa_{(b)}$, b=1,2	$\kappa_{(b)}$, b=4
15	0.01	100
35	0.01	10
65	100	10

MTS tasarımının simülasyonunda, NiTi tellerinin 15 °C ile 80 °C sıcaklıklar arasında çalışacağı tahmin edilmektedir. Başlangıçta gerilme altında olan NiTi teller, sırasıyla 15 °C, soğutulduğunda ve 80 °C ısıtıldığında uzunluğu artar ve azalır. Bu durumda, pil hücresi daha düşük bir sıcaklıkta olduğunda 1 mm boşluk olacaktır, ancak sıcaklık yükseldiğinde NiTi östenit faza geçerek telin, alüminyum ısının batmasına ve pil hücrelerinin sıkışmasına neden olacaktır. NiTi'nin 5 soğutma ve ısıtma döngüsü için sıcaklıkla değişimi Şekil 3.2'de gösterilmektedir. İzobarik model analizinde, NiTi alaşımına 100 MPa'lık bir sapma gerilme basıncı uygulanması öngörülmektedir.



Şekil 3.2: NiTi alaşımının 5 çevrimde izobarik model sonucu

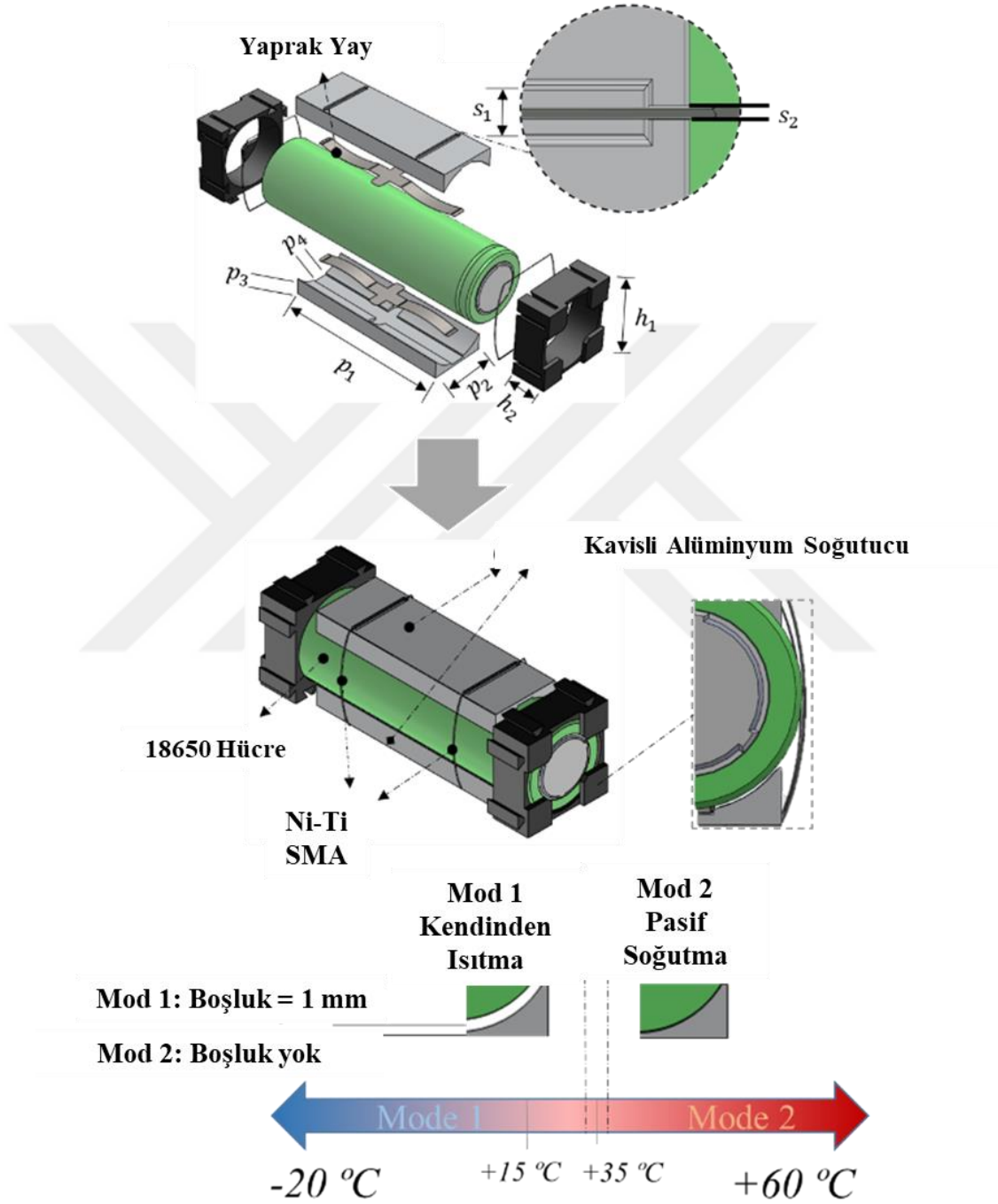
3.1.3 Mekanik tasarım

Bu tezde iki farklı uygulama grubu için iki farklı BTMS tasarımı önerilmiştir. Birincisi, kompakt ve modülsüz olması gereken uygulamalar için tasarlanmıştır. İkinci tasarım ise, büyük ölçekli ve modüler tasarım uygulamaları için dörtlü bir modül tasarımı önerilmiştir. Her iki tasarım, SolidWorks® programında tasarlanmıştır. Tasarımlar, ticari olarak yaygın olan silindirik 18650 Li-ion hücreler ile kullanıma uygundur.

3.1.3.1 Tasarım I

Şekil 3.3’de verilen ilk tasarımda, bir hücre ve iki standart plastik hücre tutucular ile ve aynı zamanda soğutma amaçlı iki kıvrımlı alüminyum 6061 alaşımlı parça ile sandviçlenmiştir. Hücre ile plaka kısmı arasında 1mm boşluk bırakılarak çelik yaprak yay parçaları yerleştirilir. İki adet NiTi SMA teli ile sarılan bu parçalar hücre yüzeyine dokundurulur. Tasarım-I’in NiTi SMA telleri 51 mm uzunluğunda ve 0,4 mm çapında olarak kurgulanmıştır. NiTi SMA telinin uzunluğu pilin sıcaklığına göre iki temas noktası üzerinden değişir. Pil önerilen maksimum sıcaklığa ulaştığında, NiTi SMA telleri kısalmır ve pil ile soğutucu plakalar arasındaki boşluk sıfır olur (mod 2). Bu basınçlı sıkıştırma sistemdeki ısı iletimini kolaylaştırır. Soğuk bir ortamda NiTi SMA telleri orijinal uzunluğuna geri döner ve yaprak yaylar yardımıyla hücre

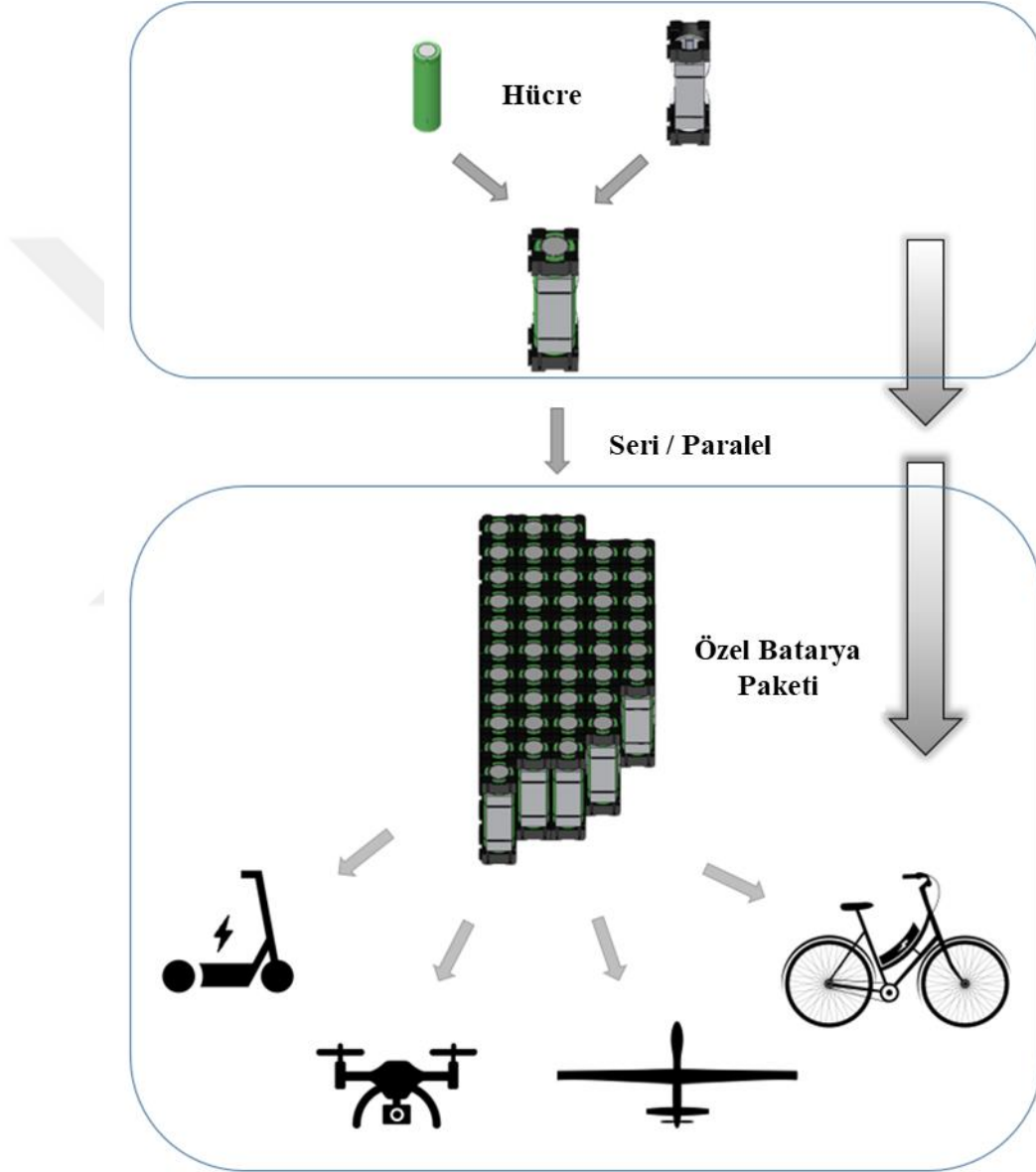
ile iki kıvrımlı alüminyum ısı emici arasında tekrar 1 mm boşluk oluşur (mod 1). Bu da, kendinden ısıtmalı yöntemi sayesinde pilin kendi sıcaklığını absorbe ederek ısı iletimini engeller. Başka bir deyişle, NiTi SMA telleri pasif bir anahtarlama işlemini gerçekleştirir.



Şekil 3.3: Tasarım I

Hücrelerin tüm süreç boyunca tutucu tarafından sabit kalması, bu sistemin seri ve paralel olarak çoğaltılmasına yardımcı olacaktır. Bu tasarım, piyasada yaygın olan tutucuları içerdiğinden ve tek hücreli bir modül olduğundan özel batarya paketi

imalatında kolay entegre edilebilir. Bu uygulamalardan bazıları, Şekil 3.4’de verildiği gibi dronlar, insansız hava araçları, elektrikli bisikletler ve scooterlar olabilir. Bu uygulamaların kullanıcıları genelde pahalı ağır ve enerji tüketen BTMS’leri tercih etmemekteler ve aynı zamanda sınırlı batarya paketi alanına sahiplerdir. Dolayısıyla, bu tasarım bu denli kullanıcılara iyi bir alternatif sunabilmektedir.

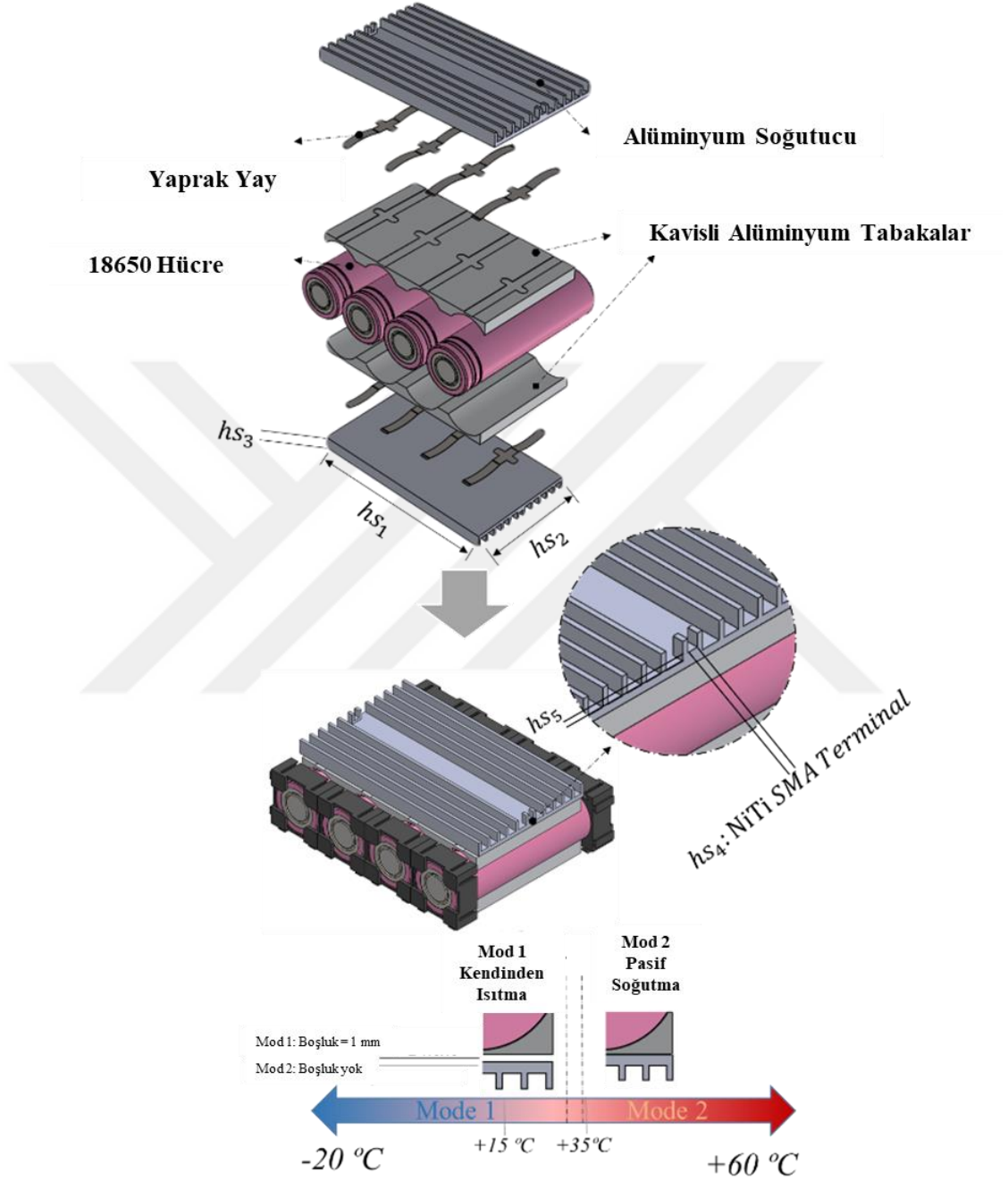


Şekil 3.4: Tasarım-I batarya paketi imalat aşamaları ve uygulamaları

3.1.3.2 Tasarım II

Şekil 3.5’de gösterilen ikinci BTMS tasarımında, karşılıklı veya tek tarafta yerleştirilen bir/iki adet ek soğutucu ile dört hücre sıkıştırılmaktadır. Bu tasarımdaki yaprak yaylar (8 adet), 1 mm boşluğu hücreler ile kıvrımlı soğutucu arasında değil,

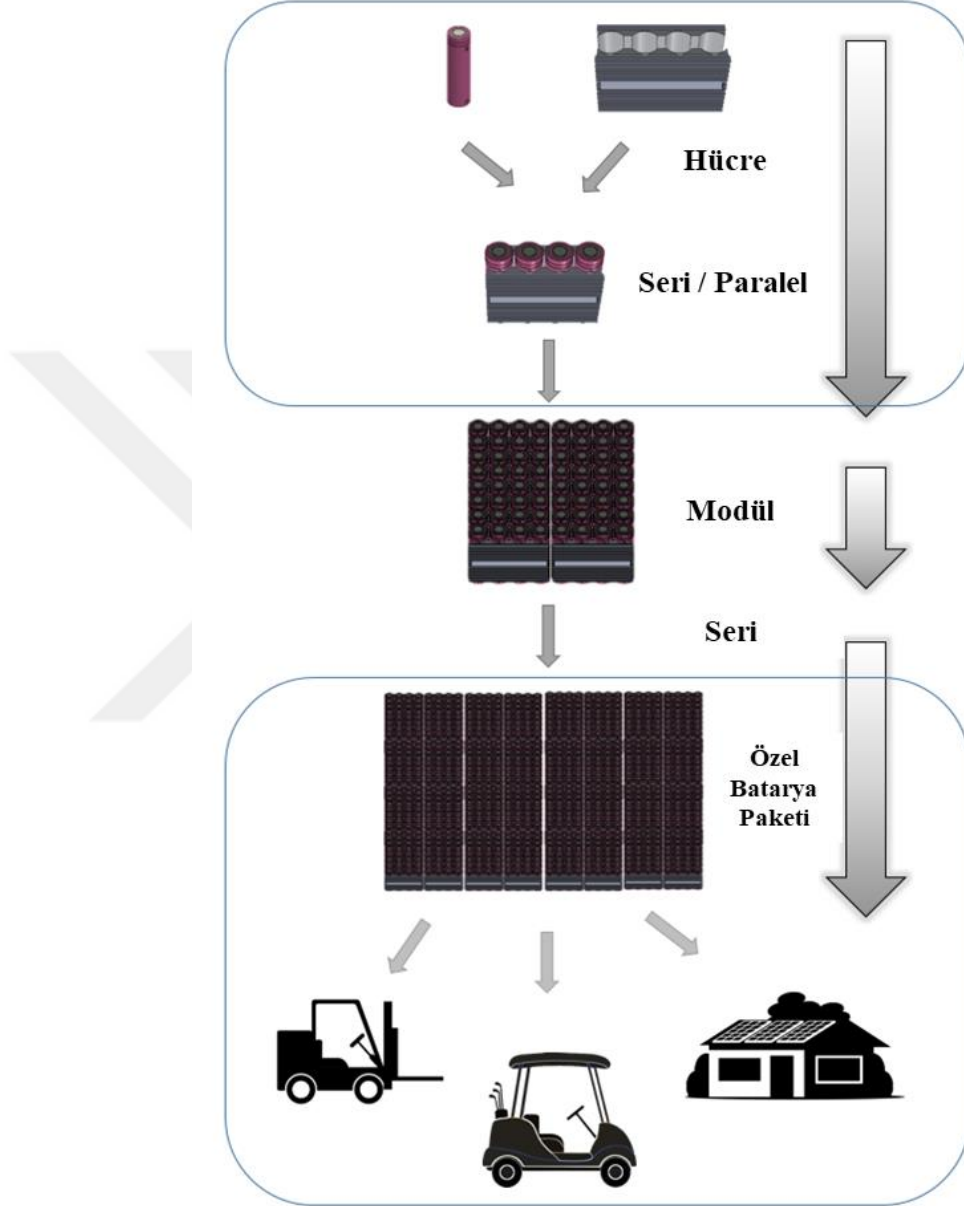
4lü kıvrımlı soğutucu ve ek soğutucu arasına yerleştirilir. Bu durumda dörtlü kıvrımlı alüminyum soğutucu, hücreler ve tutucular sabit kalmaktadır. Ancak kanatlı ek soğutucu, artan/azalan hücre sıcaklığıyla birlikte hareket etmektedir.



Şekil 3.5: Tasarım II

NiTi SMA telinin uzunluğu ek soğutucu ile minimum temas sağlayarak ve hücreye dokunarak kısılır. Bu ek soğutucular endüstriyel uygulamalara göre tek veya çift taraflı olarak yerleştirilebilir. Tasarım-II için 202 mm uzunluğunda ve 0.4 mm çapında NiTi SMA tel gereklidir.

Tasarım-II'nin endüstriyel uygulamalarından bazıları, Şekil 3.6'da gösterildiği gibi, elektrikli forkliftler, golf arabaları, ev tipi güneş ve rüzgar türbini sistemlerdir. Tasarım-II, endüstride hızlı üretim için hafif, düşük maliyetli bir çözümdür. Tasarım-I ile karşılaştırıldığında, ekstra soğutucuya sahip olduğu için daha verimlidir.



Şekil 3.6: Tasarım-II batarya paketi imalat aşamaları ve uygulamaları

Önerilen tasarımların parametreleri Çizelge 3.3'de gösterilmektedir.

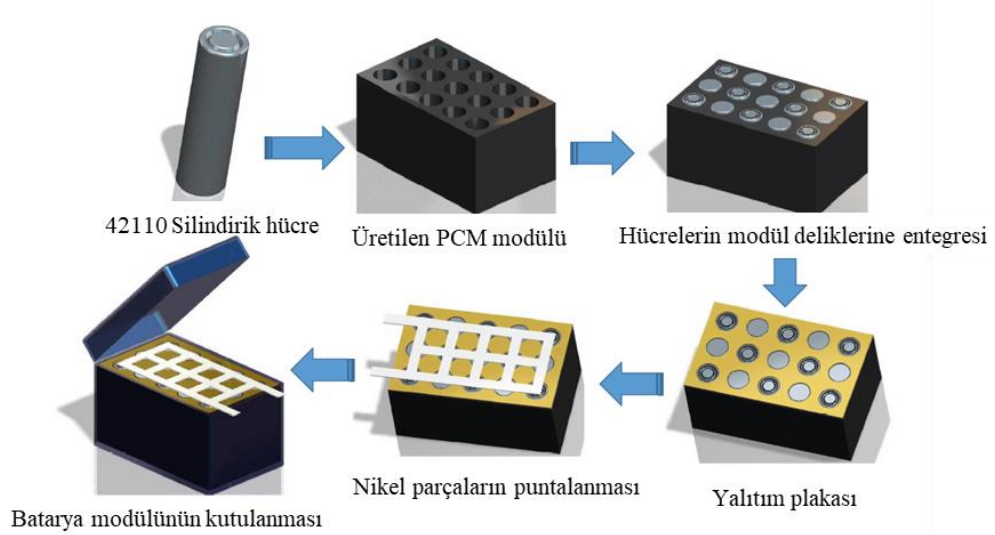
Çizelge 3.3: Mekanik tasarım ölçüleri

Parametre	mm	Parametre	mm
Tasarım I		Tasarım II	
p1	45	hs1	77
p2	15	hs2	45
p3	4.5	hs3	1
p4	4.2	hs4	5
s1	1.2	hs5	1
s2	0.4		
h1	20		
h2	7.7		

3.2 PCM Hibrid Sistem Tasarımı

3.2.1 Örnek Tasarımlar ve Uygulamalar

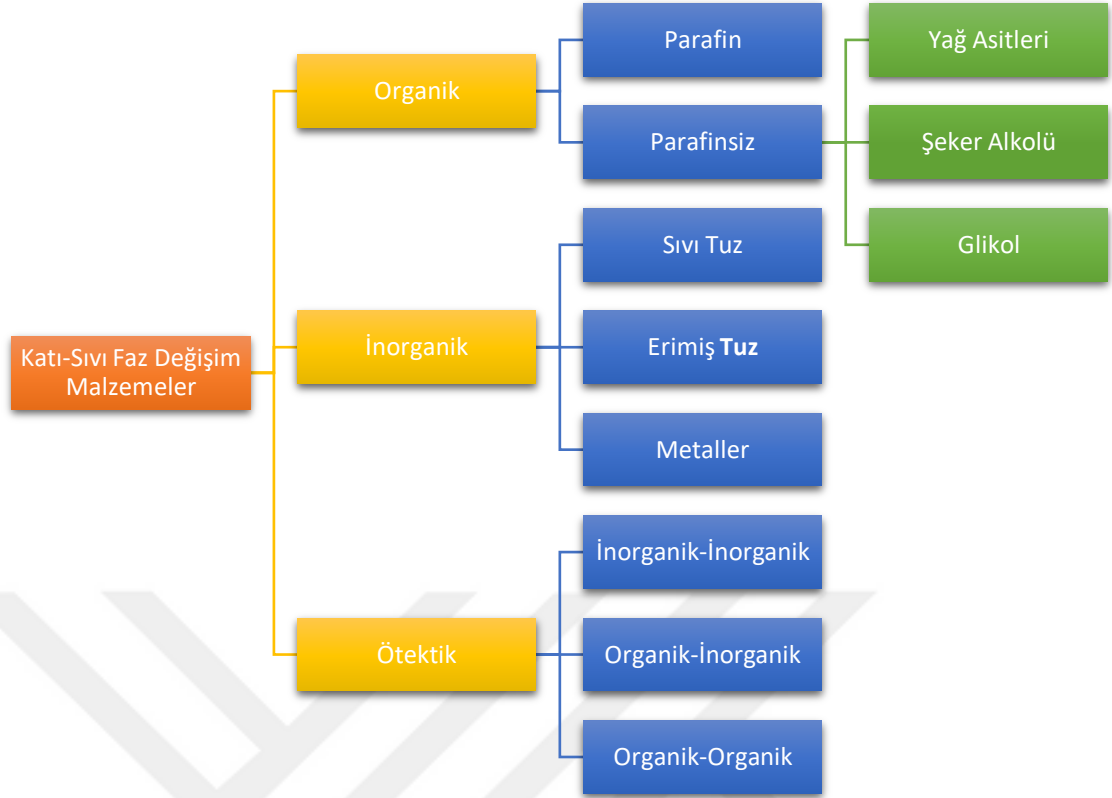
Zhang ve arkadaşları (Zhang et al, 2017) (Şekil 3.7), çalışmalarında parafin ve genişletilmiş grafit kompozit tasarımı gerçekleştirmiş ve karakterize etmişlerdir. Bu çalışmada 15 adet 42110 LiFePO₄ hücresiyle bir PCM modülü oluşturulmuştur. Batarya grubunun (48 V/10 Ah) sıcaklık ölçümleri oda sıcaklığında (25°C), yüksek sıcaklıkta (35°C), ve çok düşük sıcaklıkta (-20°C) alınmıştır.



Şekil 3.7: Zhang grafit kompozit tasarımı

Kaynak: (Zhang et al, 2017)

İlgili makalede tasarımın maksimum sıcaklığının 42°C ve tepe noktasındaki sıcaklık farkının 5°C'de kontrol edilebileceğini gösterilmiştir. Ayrıca, 10 C darbe deşarjda, en yüksek sıcaklık her zaman 50°C'nin altında tutulup ısı yayılımı gözlemlenmiştir.



Şekil 3.9: Genel SLPCM kategorileri

Parafinlerin BTMS'lere uygun görülmesinin sebebi yüksek faz değişimi entalpisine sahip olmalarıdır. Diğer bir avantajı ise çeşitli erime noktalarına sahip olmalarıdır. Böylece Li-ion bataryaların ideal çalışma sıcaklık aralığına uygun bir organik parafin seçimi yapılması mümkün kılınmaktadır.

PCM'in sistemde kullanılması gereken miktarın hesaplanması gerekmektedir. Pilin ısı üretimi, PCM'in hissedilebilir ısıya, PCM'in gizli ısıya ve taşınım ısı dağılımına eşittir. Taşınım yoluyla ısı aktarımı ihmal edilebilir olduğundan bu tanım aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$Q = mc_p \Delta T + m H \quad (3.16)$$

Formülde Q , pil hücresi tarafından üretilen ısıdır. m , PCM'in ağırlığı olup c_p ise PCM'in özgül ısı kapasitesidir. H , faz entalpisidir ve ΔT sıcaklık farkını ifade etmektedir. Formüle göre bir 2 Ah kapasiteye sahip 18650 Li-ion hücresi yaklaşık 12g PCM'e ihtiyaç duymaktadır. Diğer taraftan, PCM faz değiştirme işlemi yaptığında %10 oranında hacim büyümesi yapacağından sistemin bu miktarda hacim

rezervi olması gerekmektedir (Khateeb et al, 2004; Zhang et al, 2020; Cao et al, 2017; Zhang et al, 2019).

PCM materyallerinin termal iletkenliğinin düşük olmasında dolayı ilgili çalışmalarda ısı iletkenliği yüksek olan metal, yarı metal veya metal olmayan materyaller ile birleştirme yapılmaktadır. Özellikle ağırlığın ve maliyetin önem taşıdığı uygulamalarda genişletilmiş grafit (Expended Graphite - EG) parçaların seçimi cazip gelmektedir. Seçilen organik parafine EG' eklenince, az da olsa sistemin özgül ısı kapasitesini düşürse de termal iletkenliğini iki katına çıkarılması beklenmektedir (Ling et al, 2015).

PCM-EG parafin ve genişletilmiş grafitin belli oranlarla bir araya getirilmesidir. Bu çalışmada ilk etapta sistem hatalarını ve riskini düşürmek için hazır PCM-EG materyali kullanılmıştır. Daha sonraki çalışmalarda bu karışımın optimum karışım çalışması yapılacaktır. Bu çalışmada karışımı hazır bir ürün kullanılmış olup ürün özellikleri Çizelge 3.4'de sunulmuştur (Pra et al, 2021).

Çizelge 3.4: PCM-EG özellikleri

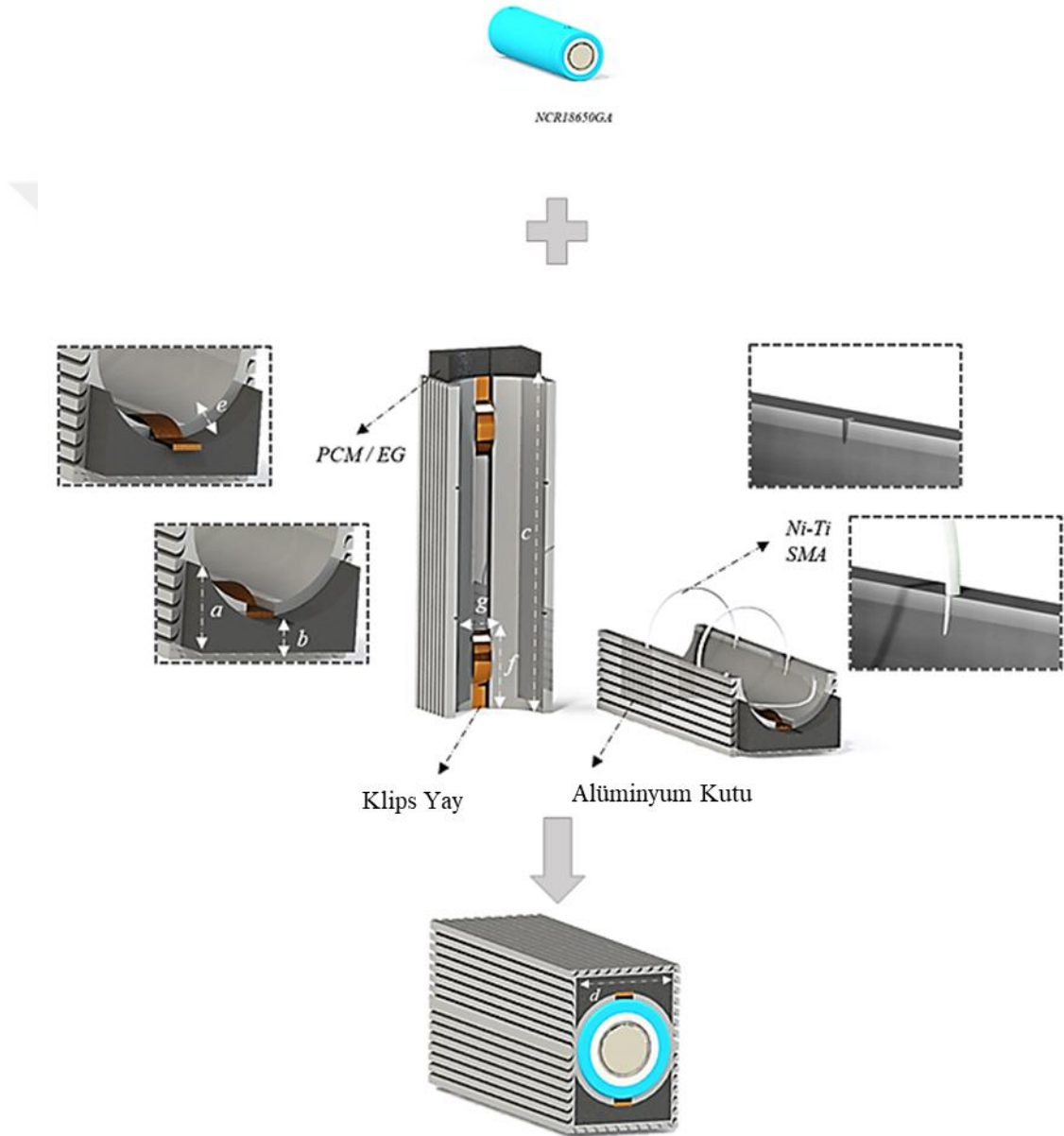
Parametreler	Açıklama	Değerler
Erime noktası		37 °C
Erime aralığı		32-38 °C
Yoğunluk	@oda sıcaklığı	895 kg/ m ³
Termal genleşme-katı faz	Ortalama değer	0.100 %/°C
Erime sırasında termal genleşme		0.841 %/°C
Termal genleşme-sıvı faz	Ortalama değer	0.075 %/°C
Termal iletkenlik	Yatay düzlem Dikey yön	10-25 W/m/K 6-12
Gizli ısı		160 J/g
Özgül ısı	Katı Sıvı	1.91 J/g/°C 2.25
Elektriksel direnç	Yatay düzlem Dikey yön	0.41 10–3Ωm 0.19
Termal çevirim ömrü	Erime çevrimi sayısı	>10,000

Kaynak: (Pra et al, 2021)

3.2.3 Sistem dizaynı

Bu çalışmada önceki tasarımın performansını yükseltilmesi adına, dizayna PCM-EG (Phase Change Material – Expended Graphite) karışımının sisteme eklenmesi planlanmıştır. Şekil 3.10' da entegrasyonu gerçekleştirilmiş sistemin tasarımı sunulmuştur. Alüminyumun iç kısmı boşaltılarak sisteme faz değişim malzeme ve

genişletilmiş grafit karışımının eklenmesiyle ON modunda pil hücresinin muhtemel sıcaklığı sistem tarafından absorbe edilecektir. OFF modunda ise, sistem, emilen sıcaklığı pil hücresinden ayrı tutacaktır. Sistem yine NiTi akıllı alaşım vasıtasıyla dinamik hareketini sağlayacaktır. Sistem için 3 farklı tasarım yapıp SolidWorks® programıyla soğutabilme simülasyonları yapılmıştır. Çalışma sonucunda alüminyum soğutucusu için üçüncü tasarım en iyi performansı gösterdiğinden nihai tasarım olarak verilmiştir.



Şekil 3.10: PCM-NiTi hibrid BTMS model

Yukarıda gösterildiği gibi BTMS, Alüminyum bir kutu, bu kutunun içerisine yerleştirilen PCM-EG, şekil alaşımlı nikel titanyum tel, yay ve 18650 pilden oluşmaktadır. Özellikle önerilen sistemlerde, PCM tabanlı BTMS'lerin geleneksel

düzenlemelerinden farklı olarak şekil alaşımlı nikel titanyum tel ile hibrid bir sistem kurularak pilin iklimlendirmesi amaçlanmıştır.

Alüminyum kutunun içerisine, pil hücresi yerleştirilmeden önce iki adet yay yerleştirilmiştir. Bu yaylar alüminyum kutu ile pil arasındaki boşluğu sağlamak için kullanılmaktadır. Yeni yapılan yay tasarımının genişliği 3.50mm (g), boyu ise 15mm(f)'dir. Alüminyum kutunun iki ucuna gelecek şekilde yerleştirilmiştir.

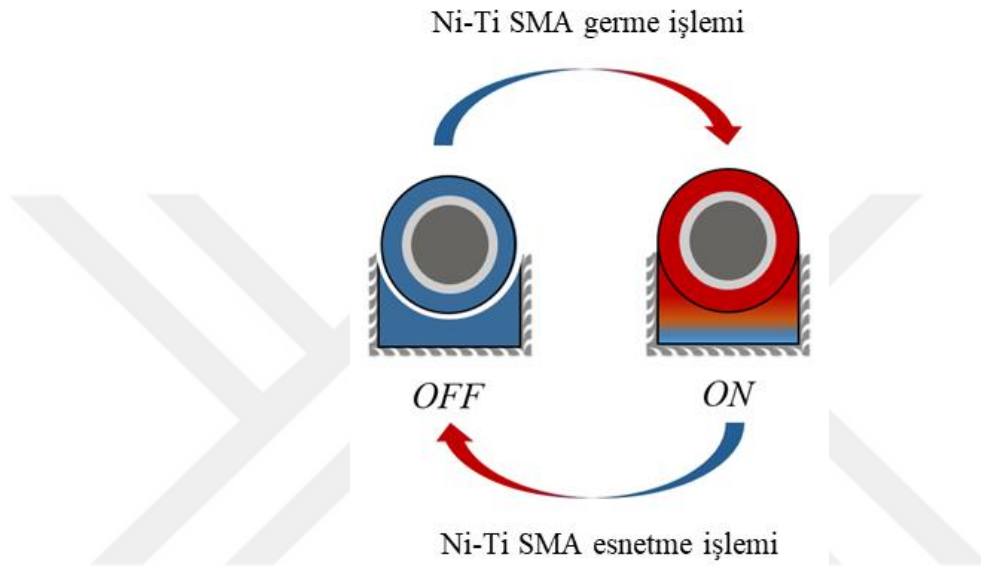
Pil tarafından üretilen ısıyı emmek için yeterli PCM-EG'nin olmasını sağlamak ve sistemin kompaktlığını korumak için PCM-EG'in kalınlığı en büyük kalınlığında 9,60mm(a), en küçük kalınlığında 3,12mm(b) ve PCM/EG yerleştirildiği alüminyum kutunun uzunluğunda 64mm (c) tasarlanmıştır.

Alüminyum kutu tasarımında malzeme seçimi olarak Al6061 seçilmiştir. Alüminyum kutunun genişliği 22mm (d), PCM-EG ile pil arasındaki kalınlığı 1,60mm(e)'dir. Alüminyum kutunun tasarımdaki görevi PCM-EG'yi sabit tutarak pilin soğutulmasını sağlamak, aynı zamanda alüminyum kutunun dış kısmında yapılan yeni tasarımla birlikte ikinci bir soğutucu görevi de yapmaktadır.

Nikel Titanyum şekil hafızalı telin çapı önceki çalışmadaki gibi 0.7mm olarak tasarlanmıştır (Joula et al, 2021). NiTi telin tasarımdaki görevi ON ve OFF modlarında (Şekil 3.11) anahtar görevi yapmaktır. Telin pil hücresine bir kısmı dokunarak sıcaklıkla birlikte uzunluğu %4 kısılınca OFF modunu, soğuyunca da eski halini alarak ON modunu gerçekleştirecektir.

Sunulan tasarımda, 18650 pil, alüminyum bir kutu ile sıkıştırılmıştır. Alüminyum kutunun içerisinde pili soğutacak olan PCM-EG yerleştirilmiştir. Yay parçaları, hücre ile levha parçası arasında 1,42 mm boşluk bırakılarak yerleştirilmiştir. İki adet NiTi SMA teli alüminyum kutunun içerisinden geçmektedir. Pil ve PCM-EG'ye bir kaç noktadan temas etmektedir. NiTi SMA telinin uzunluğu, temas noktası aracılığıyla pilin sıcaklığına göre değişir. Pil önerilen maksimum sıcaklığa ulaştığında, NiTi SMA telleri büzülür ve pil ile alüminyum kutu arasındaki boşluk sıfırlanır. Bu sıkıştırma sağlanarak PCM-EG'nin pilden ısıyı alarak kendi içerisinde depolaması kolaylaşır. Soğuk bir ortamda NiTi SMA telleri orijinal boylarına geri döner ve yaylar yardımıyla hücre ile alüminyum kutu arasında tekrar boşluk oluşturulur. Bunun sonucunda PCM-EG'nin ısıyı pilden alarak dışarıya iletmesi sağlanır.

Sistemin anahtarlama durumu (Şekil 3.11) kesilmiş bir perspektiften gösterilmiştir. Birinci durum, OFF modudur. Bu durumda gösterilen bataryanın nominal kullanım sıcaklığında olduğundan alüminyum kutu, yaylar yardımıyla pilden ayrılmıştır. NiTi teller soğuk olduğu için uzun konumdadır. İkinci durum ise on modudur. Bu durumda batarya maksimum ulaşabileceği sıcaklıkta olduğu için bir soğutmaya ihtiyaç duyar. Isınan NiTi teller kısalarak soğutma işlemini başlatır. Tamamen sıkışan alüminyum kutu ve PCM-EG pilden ısıyı alarak soğutma işlemini başlatır.



Şekil 3.11: OFF modu - ON modu durumları

4. BULGULAR

4.1 Sistemin modellenmesi ve doğrulaması

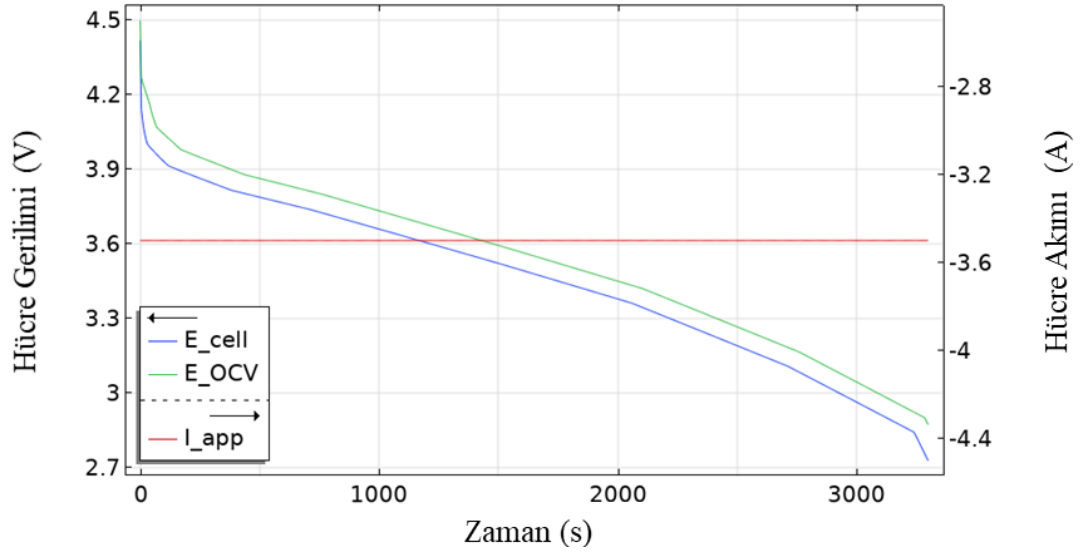
Hedeflenen sistemin modellenmesi için 2 durum olacak şekilde (ON/OFF) ele alınmıştır. Modellemede ve deney setlerinde kullanılan hücre Panasonic-Sanyo marka NCR18650GA isimli hücre (Çizelge 4.1) kullanıma uygun görülmüştür. Bu hücrenin kullanılma sebebi, piyasada en yüksek kapasiteye sahip olan pil hücresi olup bu sistem kullanıldığında ısıya karşı dayanıklı olması ve paralel sayısının azaltılmasıdır. Böylece daha yüksek deşarj akımlarıyla düşük batarya grubu maliyeti elde edilebilecektir. Modelleme 'de COMSOL® programı kullanılmıştır. İlk aşamada OFF modu için 1C, 2C ve 3C deşarj değerler doğrultusunda modelleme sonuçları elde edilmiştir. Modelleme sonrası deneysel testi ve doğrulaması gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.1: Panasonic-Sanyo NCR18650GA özellikleri

Özellikler	Değerler
Kapasite	3450 mAh
Nominal voltaj	3.6 V
	Metod: CC-CV
	Voltaj: 4.20 V
Şarj	Akım: 1475 mA
Ağırlık	47,06 gr
Enerji yoğunluğu	Volumetrik: 693 Wh/l
	gravimetrik: 224 Wh/kg
İç direnç	26,40 mOhm

Kaynak: (NCR18650GA Datasheet, 2022)

Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, pil voltajı, ohmik, aktivasyon ve konsantrasyon gibi polarizasyon kaynakları nedeniyle şarj ve deşarj sırasında açık devre voltajından sapma gösterir. Bunu takiben, pil terminal voltajı aşağıdaki denklemde gösterildiği gibi hesaplanabilir.



Şekil 4.1: 1C deşarjda pil terminal ve açık devre voltajı

Pil terminal voltajı:

$$E_{cell} = E_{OCV}(\overline{SOC}, T) + \eta_{IR} + \eta_{act} + \eta_{conc} \quad (4.1)$$

Açık devre potansiyeli:

$$E_{OCV}(\overline{SOC}, T) = E_{OCV,ref}(SOC) + (T - T_{ref}) \frac{\partial E_{OCV,ref}(SOC)}{\partial T} \quad (4.2)$$

Ohmik üst potansiyeli:

$$\eta_{IR} = \eta_{IR,1C} \frac{I_{app}}{I_{1C}} \quad (4.3)$$

Sıcaklığa bağlı ohmik üst potansiyeli:

$$\eta_{IR,1C} = \eta_{IR,1C,ref} \exp\left(\frac{E_{a,IR}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (4.4)$$

Aktifleşme üst potansiyeli:

$$\eta_{act} = \frac{2RT}{F} \operatorname{asinh}\left(\frac{I_{app}}{2J_0 I_{1C}}\right) \quad (4.5)$$

Sıcaklığa bağlı lokal akım yoğunluğu:

$$J_0 = J_{0,ref} \exp\left(\frac{E_{a,J_0}}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad (4.6)$$

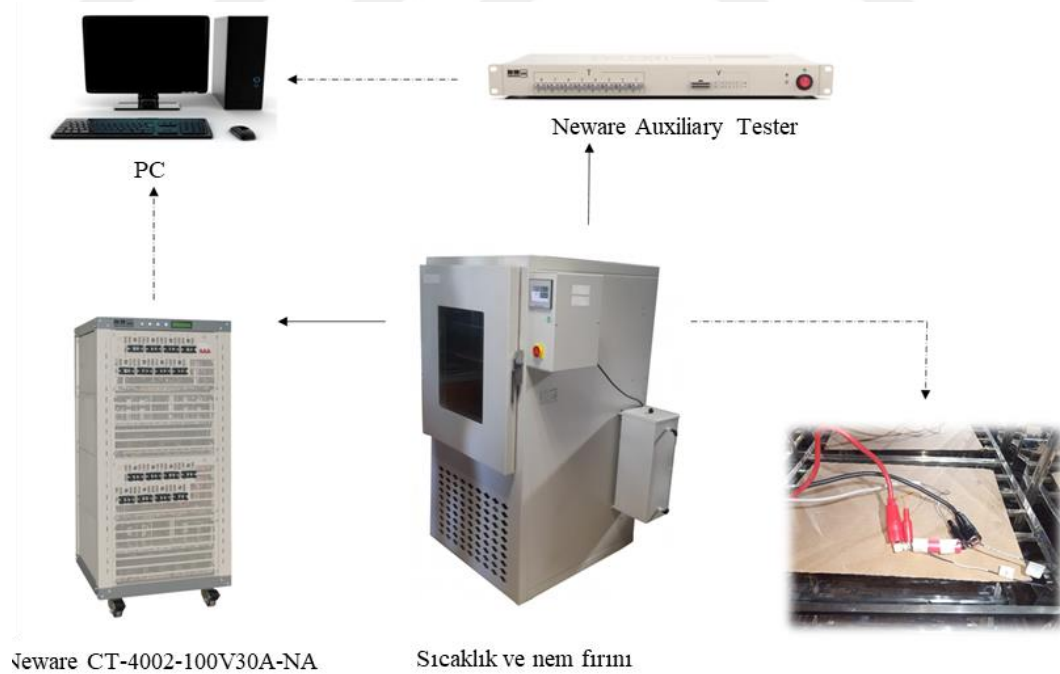
Konsantrasyon üst potansiyeli:

$$\eta_{conc} = E_{OCV}(SOC|_{x=1}, T) - E_{OCV}(\overline{SOC}, T) \quad (4.7)$$

Lumped (topaklanmış) termal modeli:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q + Q_{ted} \quad (4.8)$$

Deney düzeneğinin şematik diyagramı Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere sistemin OFF modundaki doğrulama deneyinin seti sunulmuştur. Pilin üzerine 2 adet sıcaklık sensörü yerleştirilmiş olup ek olarak 1 adet sıcaklık sensörü ortam sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Pilin ortam sıcaklığında belirli C değerleriyle şarj ve deşarj edilerek test edilmesi için çalışma ortamı iklimlendirme cihazı tarafından sağlanmıştır. Belirtilen protokol ile şarj ve deşarj edilen pilin kapasite ölçümü Neware CT-4002-100V30A-NA cihazıyla test edilerek, bilgisayarda bulunan ara yüzünden çıktıları alınmıştır. Aynı zamanda pilin üzerindeki ve ortam sıcaklığını ölçen sıcaklık sensörlerin değerleri Neware Auxiliary Tester cihazıyla ölçülerek, bilgisayardan çıktıları alınmıştır.



Şekil 4.2: Validasyon sistemi

Modelleme ve test sonuçlarının verileri EK A’ya eklenmiştir. Şarj, dinlenme ve deşarj protokolü Çizelge 4.2’de detaylandırılmıştır.

Çizelge 4.2: Şarj, deşarj ve dinlenme protokolü

No.	Adım adı	Adım süresi saat:dakika:saniye	Voltaj (V)	Akım (A)	Kesme Akımı (A)
1	Rest	00:00:10			
2	CCCV_Chg	04:30:00	4.2	1.4750	0.0670
3	Rest	00:30:00			
4	CC_Dchg		2.5	3.5	
5	Rest	00:30:00			
6	CCCV_Chg	04:30:00	4.2	1.4750	0.0670
7	Rest	00:30:00			
8	CC_Dchg		2.5	7.0	
9	Rest	00:30:00			
10	CCCV_Chg	04:30:00	4.2	1.4750	0.0670
11	Rest	00:30:00			
12	CC_Dchg		2.5	10.0	
13	Rest	00:30:00			
14	CCCV_Chg	04:30:00	3.52	1.4750	0.3500
15	Rest	00:30:00			
16	End				

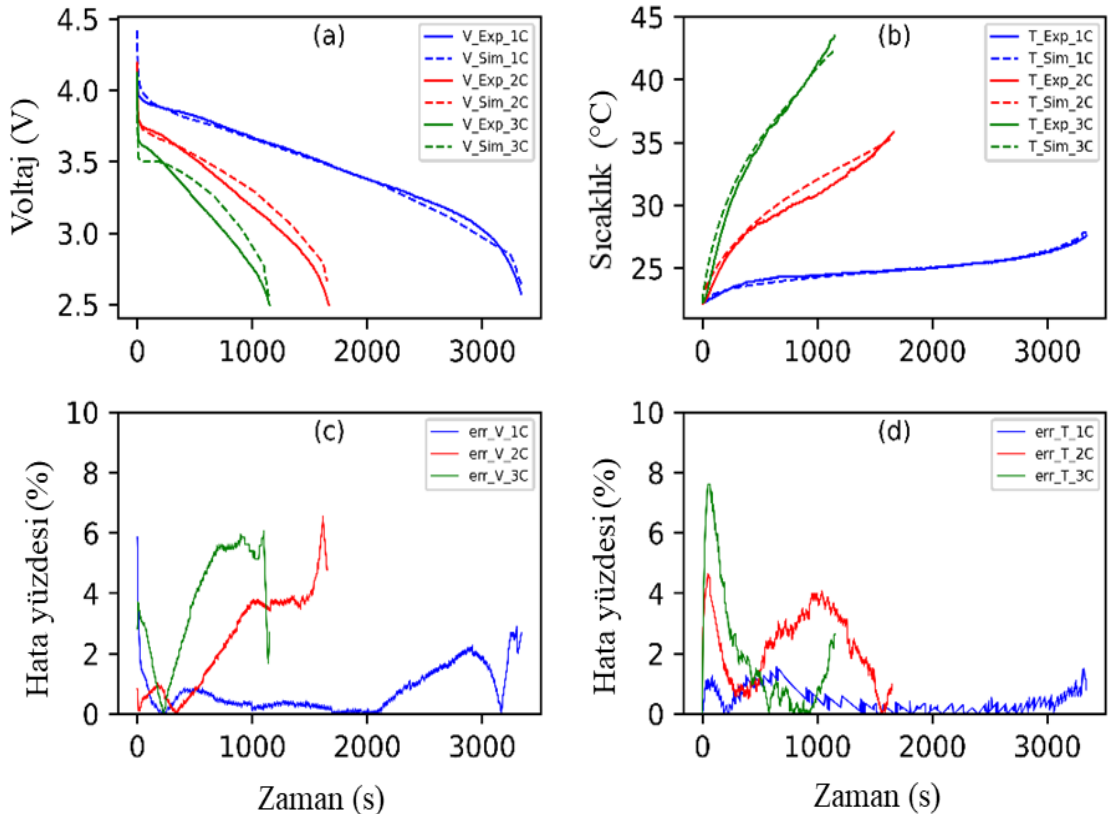
Aşağıdaki Çizelge 4.3’de OFF modundaki modelin parametreleri sunulmuştur.

Çizelge 4.3: Model parametreleri

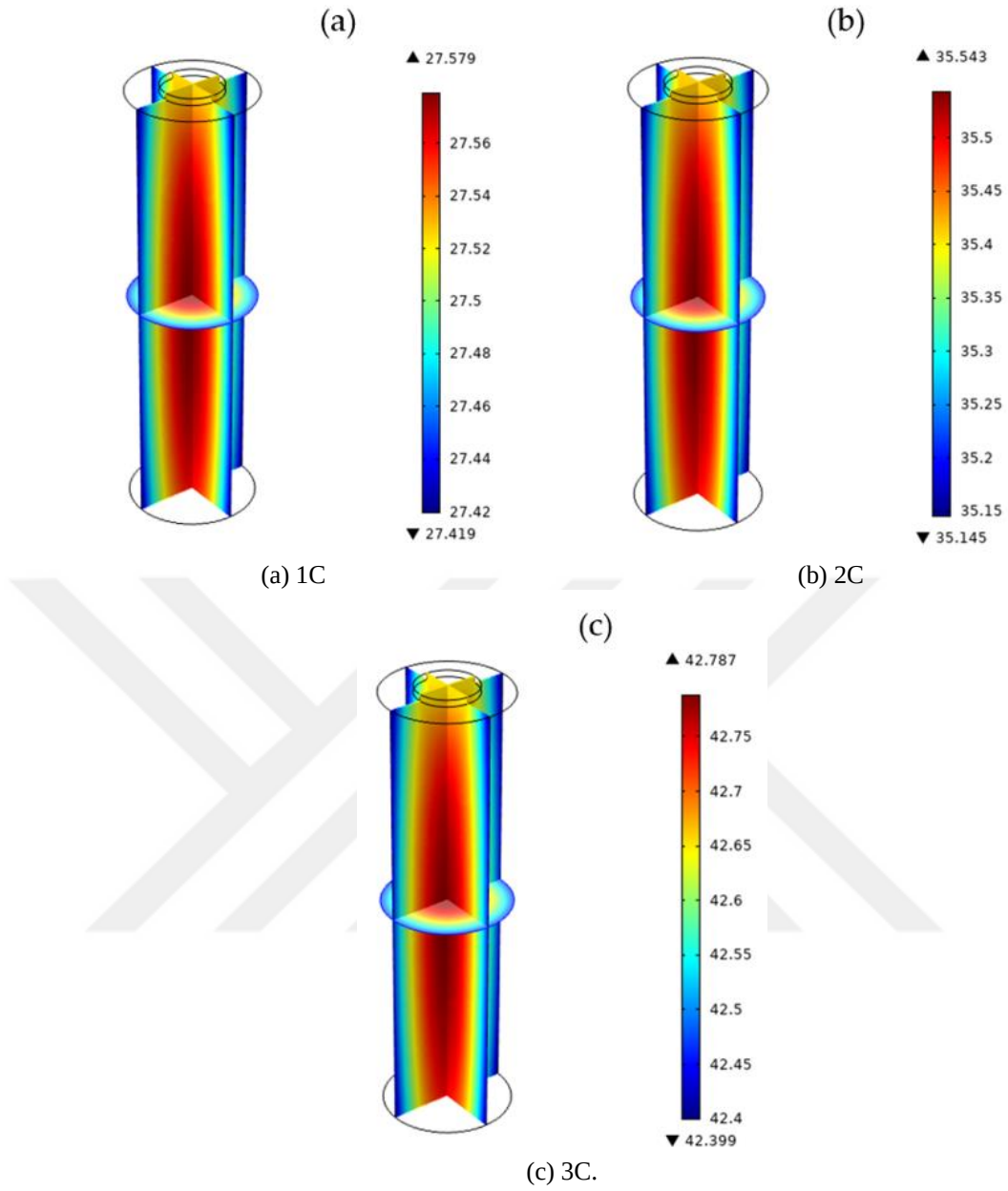
Parametre	Değer	Açıklama
$d_{batt}(mm)$	18.5	• Batarya çapı
$h_{batt}(mm)$	64.3	• Batarya yüksekliği
$d_{tab}(mm)$	9	• Pozitif uç çapı
$h_{tab}(mm)$	1	• Pozitif uç yüksekliği
$C_p(J.kg^{-1}.K^{-1})$	910	• Batarya ısı kapasitesi
$\rho(kg.m^{-3})$	2735	• Batarya yoğunluğu
$\eta_{IR,1C,ref}(mV)$	50	• Ohmik üst potansiyel (1C ve referans sıcaklığında)
$E_{a,IR}(kj.mol^{-1})$	40	• Ohmik üst potansiyel için aktivasyon enerjisi
$J_{0,ref}(A.m^{-2})$	1	• Lokal akım yoğunluğu (referans sıcaklığında)
$E_{a,J_0}(kj.mol^{-1})$	-60	• Lokal akım yoğunluğu için aktivasyon enerji
$\tau_0(s)$	900	• Difüzyon süresi sabiti (referans sıcaklığında)
$E_{a,\tau_0}(kj.mol^{-1})$	40	• Difüzyon zaman sabiti için aktivasyon enerjisi
$k_{ang}(W.m^{-1}.K^{-1})$	30.8	• Termal iletkenlik (düz düzlem)
$k_r(W.m^{-1}.K^{-1})$	1.38	• Termal iletkenlik (çapraz düzlem)
$h(W.m^{-2}.K^{-1})$	8	• Isı transfer katsayısı
$T_m(^{\circ}C)$	37	• Erime noktası

Çizelge 4.3: (Devamı) Model parametreleri

Parametre	Değer	Açıklama
$\Delta T(^{\circ}\text{C})$	6	• Erime aralığı
$T_1(^{\circ}\text{C})$	32	• İlk sıcaklık
$T_2(^{\circ}\text{C})$	38	• Son sıcaklık
$C_{p,s}(\text{J}.kg^{-1}.K^{-1})$	1910	• Isı kapasitesi, katı
$C_{p,l}(\text{J}.kg^{-1}.K^{-1})$	2250	• Isı kapasitesi, sıvı
$\rho_s(kg.m^3)$	895	• Yoğunluk (oda sıcaklığında)
$L_{s \rightarrow l}(\text{J}.kg^{-1})$	160,000	• Gizli ısı
$k_s(\text{W}.m^{-1}.K^{-1})$	10 - 25	• Termal iletkenlik (yatay düzlem)
$k_s(\text{W}.m^{-1}.K^{-1})$	6 - 12	• Termal iletkenlik (dikey düzlem)



Şekil 4.3: Pil modelinin elektrokimyasal ve termal davranışının deneysel doğrulaması grafikleri



Şekil 4.4: OFF modunda batarya sıcaklığı (°C) profili

Diğer taraftan ON mod için ek olarak termal modelleme hesaplanmış olup PCM-EG tarafından emilen ısı miktarını hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$Q_{PCM} = mc_s(T_1 - T_m) + mL_{s \rightarrow l} + mc_l(T_2 - T_m) \quad (4.9)$$

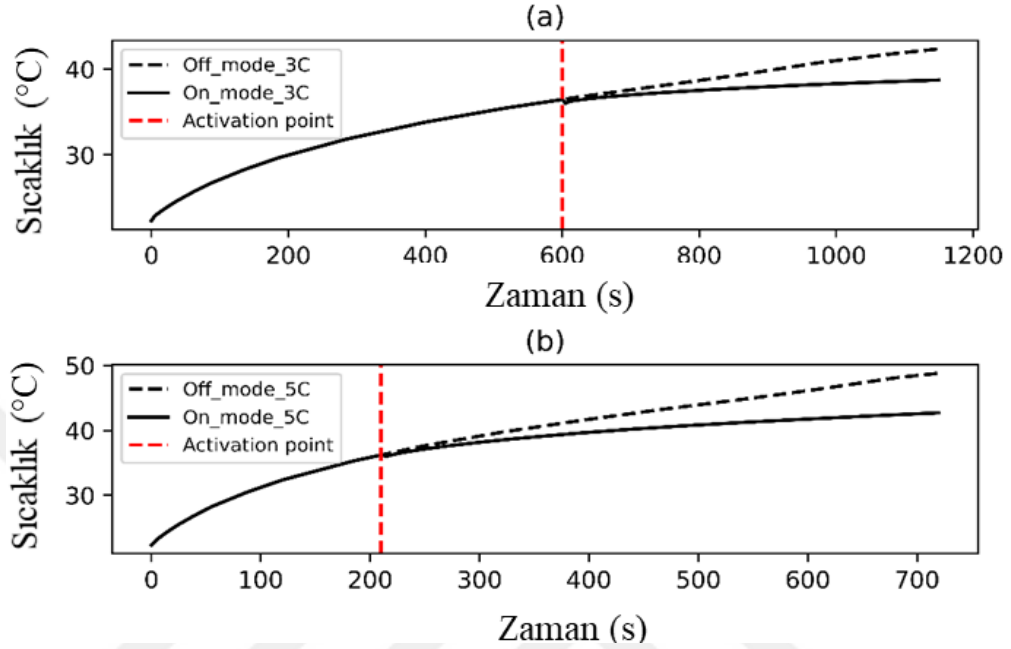
$$\rho_{PCM} = \theta_s \rho_s + \theta_l \rho_l \quad (4.10)$$

$$C_{p,PCM} = \frac{1}{\rho_{PCM}} (\theta_s \rho_s C_{p,s} + \theta_l \rho_l C_{p,l}) + L_{s \rightarrow l} \frac{\partial \alpha_m}{\partial T} \quad (4.11)$$

$$\alpha_m = \theta_s k_s + \theta_l k_l \quad (4.12)$$

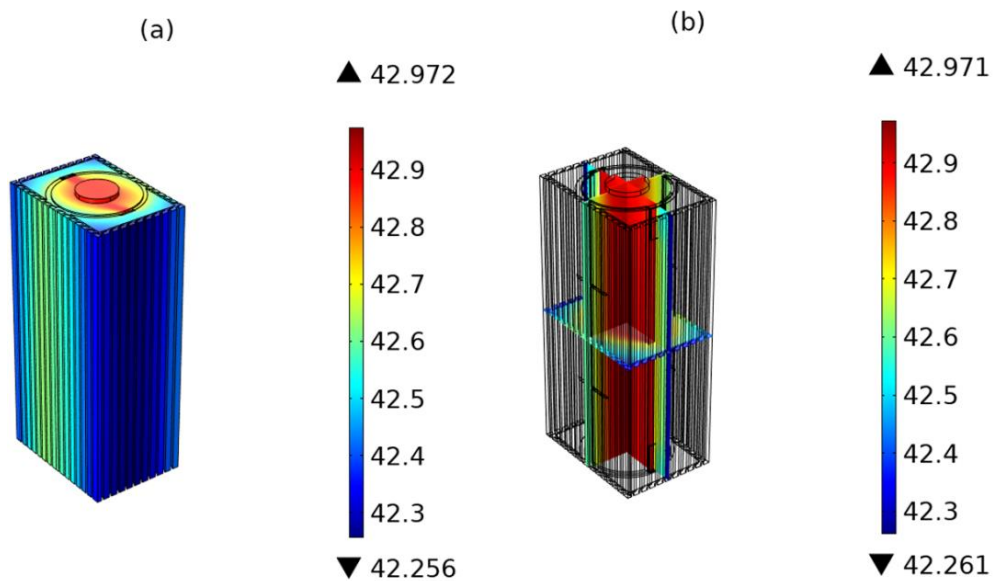
$$\theta_s + \theta_l = 1 \quad (4.13)$$

Aşağıdaki şekilde ise farklı deşarj oranlarında modlar arası sıcaklığı karakteristiği artışı verilmiştir.



Şekil 4.5: (a) 3C ve (b) 5C deşarj oranlarında ON mod ve OFF mod sıcaklık artışları.

İlgili grafiklerde zamana bağlı olarak iki mod arası geçiş sonrası sıcaklığın ON modunda tamamen daha az arttığı gözlemlenmektedir. Bu artış farkı 5C için daha da genişlemiştir. Son olarak belirlenen hücre için yüksek deşarj oranı olarak kabul edilen 5C ile hacimsel ve çok ölçekli sıcaklık profilleri sunulmuştur.



Şekil 4.6: (a)Volümetrik ve (b) 5C deşarjda çok ölçekli sıcaklık profili

Bu şekilde, hücrenin herhangi bir termal yönetim kullanmadığındaki 3C deşarj oranındaki sıcaklığını, sunulan sistemde 5C için yaklaşık olarak aynı sonucun verildiği tespit edilebilmektedir. Bu doğrultuda sistemin özellikle yüksek deşarj oranlarında etkili olduğu kanıtlanmıştır.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Günümüz dünyasında enerji sektöründe enerji depolama sistemlerinin eskisine nazaran daha çok önem arz etmektedir. Başta Li-ion pilleri olmak üzere batarya ve pil teknolojilerinin gelişimi bu sektörü bir adım ileriye taşımaktadır. Li-ion pillerin yüksek enerji ve güç yoğunluğu, uzun ömürlü, düşük öz boşalım ve hafıza etkisinin olmaması avantajlarından olsa da, bu bataryaların bir veya birden fazla sistem tarafından yönetilmeleri gerekmektedir. Bataryaların performansını etkileyen sıcaklık değişimi konusu Batarya Termal Yönetim Sistemleri tarafından yönetimi sağlanmaktadır. Bununla ilgili literatürde birçok metod ve çalışma olsa da bazı uygulamalar için (örneğin hafif elektrikli araçlar) kullanışlı değildir. Bu çalışmada 2 farklı tasarım olacak şekilde akıllı, hibrid, pasif ve uygun maliyetli bir sistem önerisi yapılmıştır.

Çalışmanın devamında bu tasarımların ileri versiyonunda faz değişim malzemeler kullanarak sistem performansının yükseltilmesi amaçlanarak bir entegrasyon tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımın da farklı modlarının modellemeleri yapıp sistem önerisi yapılmıştır. Maksimum hücre sıcaklığı 1C, 2C ve 3C deşarjda sırasıyla 27,6 °C, 35,5 °C ve 42,8 °C'ye yükseldiği tespit edilmiştir. Daha yüksek akımlarda, daha yüksek sıcaklık artışı, artan ohmik ısı yayılımı oranları ile açıklanabilmektedir. Akım oranının artması, pil sıcaklığını yükseltirken, 1C, 2C ve 3C deşarj için sırasıyla 0,16, 0,4 ve 0,39 olan sıcaklık gradyanı üzerinde çok az etkisi oluşmuştur. Sistemin özellikle 5C gibi yüksek deşarj oranlarında 10 derecelik bir sıcaklık azalması gözlemlenmiş olup sistemin gerçekleşebilmesi kanıtlanmıştır.

Çalışma sonucunda Alüminyum hibrid tasarımları seri üretime uygun, hafif, enerji tüketimi yapmayan bir sistem sunulmuştur. Bu ucuz sistem ile elektrikli bisiklet, scooter veya daha büyük enerji depolama üniteleri modül halinde birleştirilip kullanılabilir. Dünya'da bir ilk olan PCM hibrid tasarımı çalışmasında ise sıcaklığın deşarjda sistem tarafından emilmesi ve doyum noktasında bunun pile geri dönmemesi için ayrılması gerektiği öngörülüp ayırma hareketi entegre edilmiştir.

Çalışma sonucunda tüm tasarımların modüler olması fabrikasyon kolaylığı sağlayacağından sanayiye taşınabileceği de planlanabilmektedir.

Son olarak yapılan bu tez çalışması sonucunda Türkiye’de yeterli derecede akademik ve ticari çalışmalarda batarya termal yönetim sistemleri konularına yer verilmediği görülmektedir. Bu alanda çalışma yaparak farklı yöntemlerin dezavantajlarını özellikle hibrid sistem tasarımlar ile giderilmesi son derece faydalı olacaktır. Özellikle konuyla ilgili Türkçe kaynakların artmasıyla birlikte batarya termal yönetim sistemlerinin batarya paketlerinde kullanılmasıyla ilgili Türkiye’de Ar-Ge çalışmaları artacaktır.

Bir sonraki çalışmada PCM’de iyileştirmelerin yapılması planlanmaktadır. Ayrıca sistemdeki yaprak yay tarafından yapılan kapatma görevini de şekil hafızalı alaşıma ekleyerek yeni bir tasarım prototipi üretilecektir. Yapılacak çalışmanın üniversite-sanayi işbirliği kapsamında batarya termal yönetim sisteminin entegrasyonu ve pilot testlerinin gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adams, D. T., Berdichevsky, G., Colson, T. E., Hebert, A., Kohn, S., Lyons, D., Mendez, N. J., Straubel, J. B., West, D & Simpson, A., Jan. 2009, "Battery pack thermal management system," Tesla Inc, 11/779,583.
- Ades, C. J., Dilibal, S. & Engeberg, E. D. Nov. 2020, "Shape memory alloy tube actuators inherently enable internal fluidic cooling for a robotic finger under force control," *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 11, p. 115009, doi: 10.1088/1361-665x/ab931f.
- Al Hallaj, S., Maleki, H., Hong, J. S. & Selman, J. R., Oct. 1999, "Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries," *J. Power Sources*, vol. 83, no. 1–2, pp. 1–8, doi: 10.1016/S0378-7753(99)00178-0.
- Al Hallaj, S. & Selman, J. R., Feb. 2000, "Thermal management of battery systems," US6468689B1,
- Allcelltech, "AllCell," 2014. <https://www.allcelltech.com/>.
- Altug Peduk, G. S., Dilibal, S., Harrysson, O. & Ozbek, S., Jul. 2021, "Experimental Investigation on the EBM-Based Additively Manufactured Prismatic Nickel–Titanium SMA Components," *Russ. J. Non-Ferrous Met.* 2021 623, vol. 62, no. 3, pp. 357–367, doi: 10.3103/S1067821221030020.
- Baronti, F., Fantechi, G., Leonardi, E., Roncella, R. & Saletti, R. 2010, "Enhanced model for Lithium-Polymer cells including temperature effects," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 2329–2333, doi: 10.1109/IECON.2010.5675134.
- Brivio, C., 2012, "Battery energy storage systems: Modelling, applications and design criteria," *PhD Thesis*, pp. 1–223, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10589/136844>.
- Brodd, R. J., 2009, "Synopsis of the Lithium-Ion Battery Markets," *Lithium-Ion Batter. Sci. Technol.*, pp. 1–7, doi: 10.1007/978-0-387-34445-4_1.
- Buford, K., Williams, J. & Simonini, M., (Apr. 2011). "Determining most energy efficient cooling control strategy of a rechargeable energy storage system," in *SAE 2011 World Congress and Exhibition*, doi: 10.4271/2011-01-0893.
- Cao, W., Qin, Q., Cao, W., Lan, Y., Chen, T., Xu, S. & Cao, X., Apr. 2017, "Experimental and numerical studies on the explosion severities of coal dust/air mixtures in a 20-L spherical vessel," *Powder Technol.*, vol. 310, pp. 17–23, doi: 10.1016/j.powtec.2017.01.019.
- Carlioni, A., Baronti, F., Di Rienzo, R., Roncella, R. & Saletti, R. May 2020, "Effect of the DC-Link Capacitor Size on the Wireless Inductive-Coupled Opportunity-Charging of a Drone Battery," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 2621, vol. 13, no. 10, p. 2621, doi: 10.3390/EN13102621.

- Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., Xie, Y & Chen, Q., Jun. 2020, "Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems," *Trans. Tianjin Univ.*, vol. 26, no. 3, pp. 208–217, doi: 10.1007/S12209-020-00236-W/FIGURES/4.
- Cherry, C., Worley, S.& Jordan, D., Aug. 2010, "Electric Bike Sharing System Requirements and Operational Concepts," doi: 10.2172/1024211.
- Chiu, K. C., Lin, C. H., Yeh, S. F., Lin, Y. H., Huang, C. S.& Chen, K. C., Oct. 2014, "Cycle life analysis of series connected lithium-ion batteries with temperature difference," *J. Power Sources*, vol. 263, pp. 75–84, doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.04.034.
- Chu, S., Cui, Y.& Liu, N., 2016, "The path towards sustainable energy," *Nature Materials*, vol. 16, no. 1. Nature Publishing Group, pp. 16–22, Dec. 20, doi: 10.1038/nmat4834.
- De Chiffre, L., Carmignato, S., Kruth, J. P., Schmitt, R. & Weckenmann, A., Jan. 2014, "Industrial applications of computed tomography," *CIRP Ann.*, vol. 63, no. 2, pp. 655–677, doi: 10.1016/J.CIRP.2014.05.011.
- Deng, D., Sep. 2015, "Li-ion batteries: basics, progress, and challenges," *Energy Sci. Eng.*, vol. 3, no. 5, pp. 385–418, doi: 10.1002/ESE3.95.
- Dilibal, S., 2016, "Savunma ve Havacılık Uygulamalarında Uzun Süreli Isıl İşlemin NiTi Şekil Bellekli Alaşımların Termomekanik Davranışı," *Def. Sci. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–23.
- Dilibal, S., 2018, "Stabilized actuation of a novel niti shape memory alloy actuated flexible structure under thermal loading," *Mater. Tehnol.*, vol. 52, no. 5, pp. 599–605, doi: 10.17222/mit.2018.042.
- Dilibal, S., Engeberg, E. D., Oct. 2015, "Finger-like manipulator driven by antagonistic nickel-titanium shape memory alloy actuators," *Proc. 17th Int. Conf. Adv. Robot. ICAR 2015*, pp. 152–157, doi: 10.1109/ICAR.2015.7251448.
- Dilibal, S., Hamilton, R. F. & Lanba, A., Oct. 2017, "The effect of employed loading mode on the mechanical cyclic stabilization of NiTi shape memory alloys," *Intermetallics*, vol. 89, pp. 1–9, doi: 10.1016/j.intermet.2017.05.014.
- Dilibal, S., Sahin, H., Dursun, E. & Engeberg, E. D. Sep. 2017, "Nickel–titanium shape memory alloy-actuated thermal overload relay system design," *Electr. Eng.*, vol. 99, no. 3, pp. 923–930, doi: 10.1007/s00202-016-0458-2.
- Du, X., Qian, Z., Chen, Z. & Rao, Z. 2018, "Experimental investigation on mini-channel cooling–based thermal management for Li-ion battery module under different cooling schemes," *International Journal of Energy Research*, vol. 42, no. 8. pp. 2781–2788, doi: 10.1002/er.4067.
- Dunn, B., Kamath, H. & Tarascon, J. M., 2011, "Electrical energy storage for the grid: A battery of choices," *Science*, vol. 334, no. 6058. American Association for the Advancement of Science, pp. 928–935, Nov. 18, doi: 10.1126/science.1212741.

- European Parliament, 2013, “MEPs Ban Cadmium from Power Tool Batteries and Mercury from Button Cells,” <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20131004IPR21519/meps-ban-cadmium-from-power-tool-batteries-and-mercury-from-button-cells?quizBaseUrl=https%3A%2F%2Fquizweb.europarl.europa.eu> (accessed Oct. 23, 2020).
- Fetcenko, M. A., Ovshinsky, S. R., Reichman, B., Young, K., Fierro, C., Koch, J., Zallen, A., Mays, W. & Ouchi, T., Mar. 2007, “Recent advances in NiMH battery technology,” *J. Power Sources*, vol. 165, no. 2, pp. 544–551, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.10.036.
- Garche, J. & Brandt, K. 2018, “*Electrochemical power sources: Fundamentals, systems, and applications: Li-battery safety*.” Elsevier.
- Garche, J. & Dyer, C. K., Moseley, P. T., Ogumi, Z., Rand, D. A. J., Scrosati, B., 2009, *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Newnes.
- Güllü, A., Danquah, J. O. & Dilibal, S., Nov. 2021, “Characterization of energy dissipative cushions made of Ni–Ti shape memory alloy,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 31, no. 1, p. 015018, doi: 10.1088/1361-665X/AC383D.
- Hao, M., Li, J., Park, S., Moura, S. & Dames, C., 2018, “Efficient thermal management of Li-ion batteries with a passive interfacial thermal regulator based on a shape memory alloy,” *Nat. Energy*, vol. 3, no. 10, pp. 899–906, doi: 10.1038/s41560-018-0243-8.
- Hashemi, S. R., Bahadoran Baghbadorani, A., Esmaeeli, R., Mahajan, A. & Farhad, S., Mar. 2021, “Machine learning-based model for lithium-ion batteries in BMS of electric/hybrid electric aircraft,” *Int. J. Energy Res.*, vol. 45, no. 4, pp. 5747–5765, doi: 10.1002/ER.6197.
- Hesse, H. C., Schimpe, M., Kucevic, D. & Jossen, A., Dec. 2017, “Lithium-Ion Battery Storage for the Grid—A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids,” *Energies* 2017, Vol. 10, Page 2107, vol. 10, no. 12, p. 2107, doi: 10.3390/EN10122107.
- Horiba, T., 2014, “Lithium-ion battery systems,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 939–950, doi: 10.1109/JPROC.2014.2319832.
- Huang, W., Feb. 2002, “On the selection of shape memory alloys for actuators,” *Mater. Des.*, vol. 23, no. 1, pp. 11–19, doi: 10.1016/S0261-3069(01)00039-5.
- Hyvönen, K., Repo, P. & Lammi, M., Jan. 2016, “Light Electric Vehicles: Substitution and Future Uses,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 19, pp. 258–268, doi: 10.1016/J.TRPRO.2016.12.085.
- Jani, J. M., Leary, M. & Subic, A. S., 2014, “Shape Memory Alloys in Automotive Applications,” *Appl. Mech. Mater.*, vol. 663, pp. 248–253, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.663.248.
- Ji, Y. & Wang, C. Y., 2013, “Heating strategies for Li-ion batteries operated from subzero temperatures,” *Electrochim. Acta*, vol. 107, pp. 664–674, doi: 10.1016/j.electacta.2013.03.147.

- Jiaqiang, E., Yue, M., Chen, J., Zhu, H., Deng, Y., Zhu, Y., Zhang, F., Wen, M., Zhang, B. & Kang, S., 2018, "Effects of the different air cooling strategies on cooling performance of a lithium-ion battery module with baffle," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 144, pp. 231–241, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.08.064.
- Joula, M., Dilibal, S. & Owusu-Danquah, J., Mar. 2021, "Smart adaptronic thermal management system designs for the Li-ion battery packs," *2021 IEEE Int. Conf. Mechatronics, ICM 2021*, Mar. 2021, doi: 10.1109/ICM46511.2021.9385607.
- Julien, C., Mauger, A., Vijn, A. & Zaghib, K., 2016, "Lithium Batteries," in *Lithium Batteries*, Cham: Springer International Publishing, pp. 29–68.
- Jung, J., Zhang, L. & Zhang, J., 2015, "*Lead-acid battery technologies: fundamentals, materials, and applications*," vol. 8. Crc Press.
- Karadeniz, O. 2017, "Lityum Tabanlı Enerji Depolama Üniteleri İçin Batarya Yönetim Sistemi Tasarımı," İstanbul Üniversitesi.
- Keyser, M., Pesaran, A., Li, Q., Santhanagopalan, S., Smith, K., Wood, E. & Ahmed, M.A., Nov. 2017, "Enabling fast charging – Battery thermal considerations," *J. Power Sources*, vol. 367, pp. 228–236, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.07.009.
- Khateeb, S. A., Farid, M. M., Selman, J. R. & Al-Hallaj, S., Apr. 2004, "Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter," *J. Power Sources*, vol. 128, no. 2, pp. 292–307, doi: 10.1016/j.jpowsour.2003.09.070.
- Kılıç, A., 2016, "Batarya yönetim sistemlerinde ana ve uydu denetleyici modül tasarımı ve can protokolü kullanımı," Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lacerda, V. G., Mageste, A. B., Santos, I. J. B., da Silva, L. H. M. & da Silva, M. do C. H., Sep. 2009, "Separation of Cd and Ni from Ni-Cd batteries by an environmentally safe methodology employing aqueous two-phase systems," *J. Power Sources*, vol. 193, no. 2, pp. 908–913, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.05.004.
- Lavoie, Y., Danet, F. & Lombard, B. Dec. 2017, "Lithium-ion batteries for industrial applications," *2017 Pet. Chem. Ind. Tech. Conf. PCIC 2017*, vol. 2017-Decem, pp. 283–290, doi: 10.1109/PCICON.2017.8188747.
- Lawson, B. E., Mitchell, J., Truex, D., Shultz, A., Ledoux, E. & Goldfarb, M., Dec. 2014, "A robotic leg prosthesis: Design, control, and implementation," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 21, no. 4, pp. 70–81, doi: 10.1109/MRA.2014.2360303.
- Learn About Batteries - Battery University. <https://batteryuniversity.com/articles> (accessed Feb. 01, 2022).
- Lin, M., Vatani, M., Choi, J. W., Dilibal, S. & Engeberg, E. D., Nov. 2020, "Compliant underwater manipulator with integrated tactile sensor for nonlinear force feedback control of an SMA actuation system," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 315, p. 112221, doi: 10.1016/j.sna.2020.112221.

- Ling, Z., Chen, J., Xu, T., Fang, X., Gao, X. & Zhang, Z., Jul. 2015, "Thermal conductivity of an organic phase change material/expanded graphite composite across the phase change temperature range and a novel thermal conductivity model," *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 202–208, doi: 10.1016/j.enconman.2014.11.040.
- Liu, C., Xu, D., Weng, J., Zhou, S., Li, W., Wan, Y., Jiang, S., Zhou, D., Wang, J. & Huang, Q., Oct. 2020, "Phase change materials application in battery thermal management system: A review," *Materials*, vol. 13, no. 20. MDPI AG, pp. 1–37, doi: 10.3390/ma13204622.
- Liu, H. Naqvi, I. H., Li, F., Liu, C., Shafiei, N., Li, Y. & Pecht, M., Jun. 2020, "An analytical model for the CC-CV charge of Li-ion batteries with application to degradation analysis," *J. Energy Storage*, vol. 29, p. 101342, doi: 10.1016/J.EST.2020.101342.
- Liu, H., Wei, Z., He, W. & Zhao, J., 2017, "Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review," *Energy Convers. Manag.*, vol. 150, no. May, pp. 304–330, doi: 10.1016/j.enconman.2017.08.016.
- mgm.gov.tr, 2020, Turkish State Meteorological Service, "Seasonal Temperature Analysis," <https://mgm.gov.tr/veridegerlendirme/sicaklik-analizi.aspx?s=yaz>.
- Mirvakili, S. M., Sim, D., Hunter, I. W. & Langer, R. Apr. 2020, "Actuation of untethered pneumatic artificial muscles and soft robots using magnetically induced liquid-to-gas phase transitions," *Sci. Robot.*, vol. 5, no. 41, doi: 10.1126/SCIROBOTICS.AAZ4239/SUPPL_FILE/AAZ4239_SM.PDF.
- Mo, Y., Song, W., Lee, J. K., Han, Y., Kumar, S. & Song, H. Sep. 2017, "Design of a 5V-output boost DC-DC converter with improved protection functions for battery-operated devices," *Proc. - 2017 Int. Conf. Syst. Sci. Eng. ICSSE 2017*, pp. 757–760, doi: 10.1109/ICSSE.2017.8030978.
- NCR18650GA - Lithium-ion Batteries - Secondary Batteries (Rechargeable Batteries) - Industrial Devices & Solutions - Panasonic." 2022, <https://industrial.panasonic.com/ww/products/pt/lithium-ion/models/NCR18650GA> (accessed Feb. 01, 2022).
- Nelson, R. F., Apr. 2002, "High-power batteries for the new 36/42 V automotive systems," *J. Power Sources*, vol. 107, no. 2, pp. 226–239, doi: 10.1016/S0378-7753(01)01082-5.
- Omar, F., Jimi, T. & Mohini, S., 2017, *Lightweight and Sustainable Materials for Automotive Applications*. Crc Press.
- Osiak, M., Geaney, H., Armstrong, E. & O'Dwyer C., 2014, "Structuring materials for lithium-ion batteries: Advancements in nanomaterial structure, composition, and defined assembly on cell performance," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 25, pp. 9433–9460, doi: 10.1039/c4ta00534a.
- Ölander, A., Oct. 2002, "An Electrochemical Investigation Of Solid Cadmium-Gold Alloys," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 54, no. 10, pp. 3819–3833, doi: 10.1021/JA01349A004.

- Pesaran, A. A., Aug. 2002, "Battery thermal models for hybrid vehicle simulations," in *Journal of Power Sources*, vol. 110, no. 2, pp. 377–382, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00200-8.
- Pesaran, A., Keyser, M., Kim, G. H., Santhanagopalan, S. & Smith, K. Feb. 2013, "Tools for Designing Thermal Management of Batteries in Electric Drive Vehicles (Presentation)", doi: 10.2172/1064502.
- Pesaran, A., Santhanagopalan, S. & Kim, G. H., 2013, "Addressing the impact of temperature extremes on large format li-ion batteries for vehicle applications (presentation)," *National Renewable Energy Lab.(NREL)*, Golden, CO (United States).
- Pra, F., Al Koussa, J., Ludwig, S. & De Servi, C. M., Apr. 2021 "Experimental and Numerical Investigation of the Thermal Performance of a Hybrid Battery Thermal Management System for an Electric Van," *Batter. 2021*, Vol. 7, Page 27, vol. 7, no. 2, p. 27, doi: 10.3390/BATTERIES7020027.
- Qin, P., Liao, M., Zhang, D., Liu, Y., Sun, J. & Wang, Q., Sep. 2019, Experimental and numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material," *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, pp. 1371–1381, doi: 10.1016/j.enconman.2019.05.084.
- Ramadass, P., Haran, B., White, R. & Popov, B. N., Nov. 2002, "Capacity fade of Sony 18650 cells cycled at elevated temperatures: Part I. Cycling performance," *J. Power Sources*, vol. 112, no. 2, pp. 606–613, doi: 10.1016/S0378-7753(02)00474-3.
- Rao, Z. & Wang, S., Dec. 2011, "A review of power battery thermal energy management," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 9. Pergamon, pp. 4554–4571, doi: 10.1016/j.rser.2011.07.096.
- Reddy, T. B. 2011, "Linden's Handbook of Batteries," McGraw-Hill Education, Accessed: Oct. 23, 2020. [Online]. Available: <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071624213>
- Rezvanizani, S. M., Liu, Z., Chen, Y. & Lee, J. Jun. 2014, "Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility," *J. Power Sources*, vol. 256, pp. 110–124, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2014.01.085.
- Saleeb, A. F., Dhakal, B., Dilibal, S., Owusu-Danquah, J. S. & Padula, S. A., Jan. 2015, "On the modeling of the thermo-mechanical responses of four different classes of NiTi-based shape memory materials using a general multi-mechanism framework," *Mech. Mater.*, vol. 80, no. Part A, pp. 67–86, doi: 10.1016/j.mechmat.2014.09.001.
- Saleeb, A. F., Padula, S. A. & Kumar, A., 2011, "A multi-axial, multimechanism based constitutive model for the comprehensive representation of the evolutionary response of SMAs under general thermomechanical loading conditions," *Int. J. Plast.*, vol. 27, no. 5, pp. 655–687, doi: 10.1016/j.ijplas.2010.08.012.

- Sapmaz, Y., Dilibal, S., Yilmaz, O. & Sapmaz, A. R., Jun. 2021, "Nickel-Titanium SMA Springs Actuated Bioinspired Soft Robot for Pipeline Inspections," *HORA 2021 - 3rd Int. Congr. Human-Computer Interact. Optim. Robot. Appl. Proc.*, doi: 10.1109/HORA52670.2021.9461361.
- Saxman, D. Jan. 2007, "World market for industrial batteries," *Ind. Appl. Batter.*, pp. 737–766, doi: 10.1016/B978-044452160-6/50016-4.
- Selman, J. R., Al Hallaj, S., Uchida, I. & Hirano, Y., Jul. 2001, "Cooperative research on safety fundamentals of lithium batteries," in *Journal of Power Sources*, vol. 97–98, pp. 726–732, doi: 10.1016/S0378-7753(01)00732-7.
- Soloveichik, G. L., 2011, "Battery technologies for large-scale stationary energy storage," *Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng.*, vol. 2, pp. 503–527, doi: 10.1146/annurev-chembioeng-061010-114116.
- Spillman, D. M. & Takeuchi, E. S., Jul. 2008, "Lithium ion batteries for medical devices," pp. 203–208, doi: 10.1109/BCAA.1999.795991.
- Sun, J., Li, J., Zhou, T., Yang, K., Wei, S., Tang, N., Dang, N., Li, H., Qiu, X. & Chen, L., Sep. 2016, "Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery," *Nano Energy*, vol. 27, pp. 313–319, doi: 10.1016/j.nanoen.2016.06.031.
- Sun, X., Li, Z., Wang, X. & Li, C., Dec. 2019, "Technology Development of Electric Vehicles: A Review," *Energies*, vol. 13, no. 1, p. 90, doi: 10.3390/en13010090.
- Thackeray, M. M., Wolverton, C. & Isaacs, E. D., 2012, "Electrical energy storage for transportation - Approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 7854–7863, doi: 10.1039/C2EE21892E.
- Uchida, I., Ishikawa, H., Mohamedi, M. & Umeda, M., Jun. 2003, "AC-impedance measurements during thermal runaway process in several lithium/polymer batteries," in *Journal of Power Sources*, vol. 119–121, pp. 821–825, doi: 10.1016/S0378-7753(03)00248-9.
- Vasudha, N. & Uma Rao, K. Dec. 2020, "Shape memory alloy properties, modelling aspects and potential applications - a review," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1706, no. 1, p. 012190, doi: 10.1088/1742-6596/1706/1/012190.
- Väyrynen, A., Salminen, Mar. 2012, "Lithium ion battery production," *J. Chem. Thermodyn.*, vol. 46, pp. 80–85, doi: 10.1016/j.jct.2011.09.005.
- Wang, C. Y., Zhang, G., Ge, S., Xu, T., Ji, Y., Yang, X. G. & Leng, Y., Jan. 2016, "Lithium-ion battery structure that self-heats at low temperatures," *Nature*, vol. 529, no. 7587, pp. 515–518, doi: 10.1038/nature16502.
- Wang, Q., Jiang, B., Li, B. & Yan, Y 2016, "A critical review of thermal management models and solutions of lithium-ion batteries for the development of pure electric vehicles," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 106–128, doi: 10.1016/j.rser.2016.05.033.

- Wang, W., Zhang, X., Xin, C. & Rao, Z. Apr. 2018, "An experimental study on thermal management of lithium ion battery packs using an improved passive method," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 134, pp. 163–170, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2018.02.011.
- XING MobilityTM Inc, 2017, "Xing modular battery system," <https://www.xingmobility.com/immersio-battery-system>.
- Xia, G., Cao, L. & Bi, G., 2017, "A review on battery thermal management in electric vehicle application," *J. Power Sources*, vol. 367, pp. 90–105, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.09.046.
- Ye, Y., Saw, L. H., Shi, Y. & Tay, A. A. O., Jul. 2015, "Numerical analyses on optimizing a heat pipe thermal management system for lithium-ion batteries during fast charging," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 86, pp. 281–291, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.04.066.
- Zhang, G., Ge, S., Yang, X. G., Leng, Y., Marple, D. & Wang, C. Y., Dec. 2017, "Rapid restoration of electric vehicle battery performance while driving at cold temperatures," *J. Power Sources*, vol. 371, pp. 35–40, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.10.029.
- Zhang, J., Li, X., He, F., He, J., Zhong, Z. & Zhang, G., 2017, "Experimental Investigation on Thermal Management of Electric Vehicle Battery Module with Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Material," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2017, doi: 10.1155/2017/2929473.
- Zhang, Y., Chen, R., Zhao, M., Luo, J., Feng, W., Fan, W., Tan, Y., Cao, W., Shu, C., M. & Yu, C., May 2020, "Hazard evaluation of explosion venting behaviours for premixed hydrogen-air fuels with different bursting pressures," *Fuel*, vol. 268, p. 117313, doi: 10.1016/j.fuel.2020.117313.
- Zhang, Y., Jiao, F., Huang, Q., Cao, W., Shi, L., Zhao, M., Yu, C., Nie, B. & Cao, X., Aug. 2019, "Experimental and numerical studies on the closed and vented explosion behaviors of premixed methane-hydrogen/air mixtures," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 159, p. 113907, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113907.
- Zhu, W. H., Zhu, Y., Davis, Z. & Tatarchuk, B. J. Jun. 2013, "Energy efficiency and capacity retention of Ni-MH batteries for storage applications," *Appl. Energy*, vol. 106, pp. 307–313, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.12.025.

EKLER

Ek- A: Modelleme ve test verileri

Time	V_Exp_1C	V_Sim_1C	V_Exp_2C	V_Sim_2C	V_Exp_3C	V_Sim_3C	T_Exp_1C	T_Sim_1C	T_Exp_2C	T_Sim_2C	T_Exp_3C	T_Sim_3C
0	4,1728	4,4179	4,1666	4,2006	4,1232	4,0066	22,3	22,3	22,2	22,3	22,3	22,3
5	3,9868	4,1417	3,8256	3,8498	3,7016	3,5647	22,3	22,331	22,2	22,839	22,3	22,87
10	3,9744	4,1034	3,8008	3,7973	3,6644	3,5301	22,3	22,366	22,3	22,98	22,3	23,173
15	3,962	4,0725	3,7884	3,7851	3,6458	3,5199	22,3	22,412	22,3	23,098	22,4	23,459
20	3,9558	4,0455	3,776	3,7729	3,6396	3,5156	22,3	22,458	22,4	23,216	22,5	23,732
25	3,9496	4,0253	3,7698	3,7634	3,6272	3,5128	22,3	22,501	22,4	23,326	22,6	24,004
30	3,9434	4,0058	3,7636	3,7541	3,6272	3,5098	22,3	22,543	22,5	23,436	22,8	24,255
35	3,9372	3,9982	3,7574	3,7448	3,621	3,5076	22,4	22,585	22,6	23,546	22,9	24,506
40	3,9372	3,9925	3,7512	3,7354	3,6148	3,5057	22,4	22,627	22,7	23,656	23,1	24,739
45	3,931	3,9873	3,745	3,727	3,6148	3,5036	22,4	22,66	22,7	23,755	23,2	24,958
50	3,931	3,9824	3,745	3,7241	3,6086	3,5024	22,5	22,688	22,8	23,852	23,4	25,177
55	3,9248	3,9776	3,7388	3,7215	3,6086	3,5011	22,5	22,717	22,9	23,949	23,6	25,395
60	3,9248	3,9727	3,7388	3,7189	3,6086	3,4997	22,5	22,746	23	24,046	23,8	25,614
65	3,9186	3,9678	3,7388	3,7164	3,6024	3,4983	22,6	22,774	23,1	24,132	24	25,82
70	3,9186	3,9629	3,7326	3,714	3,6024	3,4992	22,6	22,803	23,3	24,215	24,2	26,018
75	3,9124	3,958	3,7326	3,7117	3,6024	3,5001	22,6	22,831	23,4	24,299	24,5	26,216
80	3,9124	3,9531	3,7326	3,7094	3,5962	3,5009	22,6	22,86	23,5	24,382	24,6	26,413

85	3,9124	3,9484	3,7264	3,7071	3,5962	3,5017	22,6	22,884	23,6	24,466	24,8	26,611
90	3,9062	3,9439	3,7264	3,7048	3,59	3,5024	22,7	22,901	23,7	24,549	25,1	26,786
95	3,9062	3,9394	3,7264	3,7024	3,59	3,5031	22,7	22,918	23,8	24,633	25,2	26,948
100	3,9062	3,9349	3,7264	3,7001	3,5838	3,5037	22,7	22,935	23,9	24,716	25,4	27,11
105	3,9062	3,9304	3,7264	3,6978	3,5838	3,504	22,7	22,952	24	24,795	25,7	27,272
110	3,9	3,9259	3,7202	3,6954	3,5776	3,5042	22,8	22,969	24,1	24,871	25,8	27,435
115	3,9	3,9214	3,7202	3,6931	3,5776	3,5043	22,8	22,986	24,2	24,947	26	27,597
120	3,9	3,917	3,7202	3,6908	3,5714	3,5045	22,8	23,003	24,3	25,023	26,2	27,759
125	3,9	3,9139	3,714	3,6884	3,5714	3,5045	22,8	23,02	24,4	25,099	26,4	27,921
130	3,9	3,912	3,714	3,6861	3,5652	3,5045	22,9	23,037	24,5	25,175	26,5	28,083
135	3,8938	3,91	3,714	3,6837	3,559	3,5045	22,9	23,053	24,6	25,251	26,8	28,245
140	3,8938	3,908	3,714	3,6813	3,559	3,5045	22,9	23,07	24,7	25,327	26,9	28,39
145	3,8938	3,9061	3,7078	3,6788	3,5528	3,5044	22,9	23,087	24,8	25,397	27,1	28,528
150	3,8938	3,9041	3,7078	3,6763	3,5528	3,5042	23	23,104	24,9	25,46	27,3	28,666
155	3,8938	3,9022	3,7078	3,6738	3,5466	3,5041	23	23,121	25	25,524	27,5	28,803
160	3,8876	3,9002	3,7016	3,6712	3,5404	3,5037	23	23,138	25	25,588	27,7	28,941
165	3,8876	3,8982	3,7016	3,6687	3,5404	3,5033	23,1	23,155	25,1	25,651	27,8	29,079
170	3,8876	3,8963	3,7016	3,6661	3,5342	3,5028	23,1	23,168	25,2	25,715	28	29,217
175	3,8876	3,8945	3,7016	3,6638	3,5342	3,5021	23,1	23,181	25,3	25,778	28,1	29,355
180	3,8876	3,8926	3,6954	3,6626	3,528	3,5011	23,1	23,193	25,4	25,842	28,3	29,493
185	3,8876	3,8908	3,6954	3,6613	3,5218	3,5001	23,2	23,205	25,5	25,906	28,4	29,63
190	3,8876	3,889	3,6954	3,66	3,5218	3,499	23,2	23,217	25,6	25,969	28,5	29,746
195	3,8814	3,8871	3,6892	3,6587	3,5156	3,4979	23,2	23,229	25,6	26,033	28,8	29,855
200	3,8814	3,8853	3,6892	3,6574	3,5094	3,4968	23,2	23,241	25,7	26,096	28,9	29,965
205	3,8814	3,8835	3,6892	3,656	3,5094	3,4956	23,2	23,253	25,8	26,16	29,1	30,074
210	3,8814	3,8816	3,6892	3,6547	3,5032	3,4944	23,2	23,265	25,9	26,224	29,2	30,184
215	3,8814	3,8798	3,683	3,6534	3,5032	3,4932	23,3	23,278	25,9	26,287	29,3	30,293
220	3,8814	3,878	3,683	3,6521	3,497	3,4917	23,3	23,29	26	26,351	29,5	30,403
225	3,8814	3,8761	3,6768	3,6507	3,4908	3,4903	23,3	23,302	26,1	26,411	29,6	30,512
230	3,869	3,8743	3,6768	3,6491	3,4908	3,4888	23,3	23,314	26,2	26,461	29,8	30,622
235	3,869	3,8725	3,6768	3,6475	3,4846	3,4873	23,4	23,326	26,2	26,511	29,9	30,731

240	3,869	3,8706	3,6644	3,646	3,4784	3,4858	23,4	23,338	26,3	26,561	30,1	30,841
245	3,869	3,8688	3,6644	3,6444	3,4784	3,4843	23,4	23,35	26,3	26,611	30,1	30,95
250	3,869	3,867	3,6644	3,6428	3,466	3,4828	23,4	23,362	26,4	26,661	30,3	31,059
255	3,869	3,8652	3,6582	3,6412	3,4598	3,4812	23,4	23,371	26,4	26,711	30,4	31,169
260	3,869	3,8633	3,6582	3,6397	3,4598	3,4796	23,5	23,38	26,5	26,762	30,5	31,278
265	3,869	3,8615	3,652	3,6381	3,4536	3,478	23,5	23,389	26,6	26,812	30,7	31,388
270	3,869	3,8597	3,652	3,6365	3,4474	3,4764	23,5	23,398	26,6	26,862	30,7	31,497
275	3,8628	3,8578	3,652	3,6349	3,4474	3,4744	23,6	23,407	26,7	26,912	30,8	31,607
280	3,8628	3,856	3,6458	3,6333	3,4412	3,4723	23,5	23,416	26,8	26,962	30,9	31,716
285	3,8628	3,8542	3,6396	3,6317	3,435	3,4703	23,5	23,425	26,8	27,012	31	31,826
290	3,8628	3,8524	3,6396	3,6301	3,435	3,4682	23,6	23,434	26,9	27,062	31,2	31,913
295	3,8628	3,8505	3,6396	3,6285	3,4288	3,4661	23,6	23,443	26,9	27,112	31,3	31,999
300	3,8628	3,8487	3,6334	3,6269	3,4226	3,464	23,6	23,451	27	27,162	31,4	32,085
305	3,8566	3,8469	3,6334	3,6253	3,4226	3,4619	23,6	23,46	27	27,212	31,5	32,171
310	3,8566	3,845	3,6272	3,6237	3,4164	3,4598	23,6	23,469	27	27,262	31,6	32,257
315	3,8566	3,8432	3,6272	3,6221	3,4102	3,4577	23,6	23,478	27,1	27,312	31,8	32,343
320	3,8566	3,8414	3,6272	3,6204	3,404	3,4556	23,7	23,487	27,2	27,363	31,9	32,429
325	3,8566	3,8395	3,621	3,6188	3,404	3,4535	23,6	23,496	27,2	27,413	31,9	32,514
330	3,8566	3,8377	3,621	3,6172	3,3978	3,4513	23,6	23,505	27,2	27,463	32	32,6
335	3,8566	3,8359	3,6148	3,6155	3,3916	3,4492	23,7	23,514	27,3	27,513	32,1	32,686
340	3,8566	3,8341	3,6148	3,6139	3,3916	3,447	23,7	23,523	27,3	27,563	32,1	32,772
345	3,8504	3,8322	3,6086	3,6121	3,3854	3,4448	23,7	23,532	27,4	27,613	32,3	32,858
350	3,8504	3,8304	3,6086	3,6101	3,3792	3,4426	23,7	23,541	27,4	27,663	32,3	32,944
355	3,8504	3,8286	3,6024	3,6081	3,3792	3,4404	23,7	23,55	27,5	27,713	32,4	33,03
360	3,8504	3,8267	3,6024	3,6061	3,373	3,4382	23,8	23,559	27,6	27,763	32,5	33,116
365	3,8504	3,8249	3,5962	3,6041	3,3668	3,436	23,8	23,568	27,6	27,813	32,6	33,202
370	3,8504	3,8231	3,5962	3,602	3,3606	3,4338	23,8	23,577	27,7	27,863	32,7	33,288
375	3,8504	3,8213	3,59	3,6	3,3606	3,4315	23,8	23,585	27,7	27,913	32,8	33,374
380	3,8442	3,8194	3,59	3,598	3,3544	3,4293	23,9	23,594	27,8	27,964	32,9	33,46
385	3,8442	3,8176	3,5838	3,596	3,3482	3,4268	23,8	23,603	27,8	28,014	33	33,546
390	3,8442	3,8164	3,5838	3,5939	3,342	3,4242	23,9	23,612	27,8	28,057	33	33,631

395	3,8442	3,8152	3,5838	3,5917	3,342	3,4216	23,9	23,621	27,9	28,098	33,1	33,717
400	3,8442	3,814	3,5776	3,5895	3,3358	3,419	23,9	23,63	28	28,138	33,2	33,803
405	3,8442	3,8128	3,5714	3,5874	3,3296	3,4164	23,9	23,639	28	28,179	33,3	33,874
410	3,8442	3,8117	3,5714	3,5852	3,3296	3,4138	23,9	23,648	28	28,219	33,4	33,945
415	3,838	3,8105	3,5714	3,583	3,3234	3,4111	23,9	23,657	28,1	28,26	33,5	34,015
420	3,838	3,8093	3,5652	3,5808	3,3172	3,4085	23,9	23,663	28	28,301	33,6	34,085
425	3,838	3,8081	3,5652	3,5787	3,311	3,4059	23,9	23,669	28,1	28,341	33,8	34,156
430	3,838	3,8069	3,559	3,5765	3,311	3,4032	23,9	23,675	28,1	28,382	33,9	34,226
435	3,838	3,8057	3,559	3,5743	3,3048	3,4006	23,9	23,68	28,1	28,423	33,9	34,296
440	3,8318	3,8045	3,5528	3,5721	3,2986	3,3979	23,9	23,686	28,2	28,463	34	34,366
445	3,8318	3,8034	3,5528	3,5699	3,2924	3,3953	23,9	23,692	28,2	28,504	34,1	34,437
450	3,8318	3,8022	3,5466	3,5677	3,2924	3,3926	23,9	23,698	28,2	28,544	34,1	34,507
455	3,8318	3,801	3,5466	3,5655	3,2862	3,3899	24	23,703	28,3	28,585	34,2	34,577
460	3,8318	3,7998	3,5404	3,5633	3,28	3,3873	24	23,709	28,3	28,626	34,2	34,648
465	3,8256	3,7986	3,5404	3,5611	3,2676	3,3846	24	23,715	28,4	28,666	34,2	34,718
470	3,8256	3,7974	3,5342	3,5589	3,2676	3,3819	24	23,72	28,5	28,707	34,3	34,788
475	3,8256	3,7962	3,5342	3,5567	3,2614	3,379	24	23,726	28,5	28,748	34,4	34,859
480	3,8256	3,795	3,528	3,5545	3,2552	3,3762	24	23,732	28,5	28,788	34,5	34,929
485	3,8256	3,7938	3,528	3,5523	3,2552	3,3734	24	23,738	28,5	28,829	34,5	34,999
490	3,8194	3,7927	3,528	3,5501	3,249	3,3705	24	23,743	28,6	28,869	34,6	35,069
495	3,8194	3,7915	3,5218	3,5479	3,2428	3,3676	24	23,749	28,5	28,91	34,7	35,14
500	3,8194	3,7903	3,5156	3,5457	3,2366	3,3645	24,1	23,755	28,6	28,951	34,8	35,21
505	3,8194	3,7891	3,5156	3,5435	3,2366	3,3614	24	23,761	28,6	28,991	34,8	35,28
510	3,8194	3,7879	3,5094	3,5413	3,2304	3,3583	24	23,766	28,6	29,032	35	35,351
515	3,8194	3,7867	3,5094	3,5391	3,2242	3,3552	24	23,772	28,6	29,073	35	35,421
520	3,8132	3,7855	3,5094	3,5369	3,218	3,3521	24	23,778	28,6	29,113	35,1	35,482
525	3,8132	3,7843	3,5032	3,5346	3,218	3,349	24	23,783	28,6	29,154	35,2	35,542
530	3,8132	3,7832	3,5032	3,5324	3,2118	3,3459	24	23,789	28,7	29,194	35,3	35,602
535	3,8132	3,782	3,497	3,5302	3,2118	3,3428	24,1	23,795	28,8	29,235	35,4	35,662
540	3,807	3,7808	3,497	3,528	3,2056	3,3397	24,1	23,801	28,7	29,276	35,4	35,722
545	3,807	3,7796	3,4908	3,5257	3,1994	3,3366	24,1	23,806	28,7	29,316	35,5	35,782

550	3,807	3,7784	3,4908	3,5235	3,1932	3,3334	24,1	23,812	28,7	29,357	35,6	35,843
555	3,807	3,7772	3,4846	3,5212	3,1932	3,3303	24,1	23,818	28,7	29,393	35,7	35,903
560	3,8008	3,776	3,4846	3,5189	3,187	3,3272	24,1	23,823	28,8	29,426	35,8	35,963
565	3,807	3,7748	3,4784	3,5165	3,1808	3,324	24,1	23,829	28,8	29,46	35,9	36,023
570	3,8008	3,7736	3,4784	3,5142	3,1808	3,3209	24,1	23,835	28,8	29,493	36	36,083
575	3,8008	3,7725	3,466	3,5119	3,1746	3,3178	24,1	23,841	28,9	29,527	36,1	36,144
580	3,8008	3,7713	3,466	3,5095	3,1684	3,3146	24,1	23,846	28,9	29,561	36,2	36,204
585	3,7946	3,7701	3,4598	3,5072	3,1622	3,3115	24,1	23,852	28,9	29,594	36,2	36,264
590	3,7946	3,7689	3,4598	3,5049	3,1622	3,3083	24,2	23,858	28,9	29,628	36,2	36,324
595	3,7946	3,7677	3,4536	3,5025	3,156	3,3052	24,2	23,864	29	29,661	36,2	36,384
600	3,7946	3,7665	3,4536	3,5002	3,156	3,302	24,1	23,869	29	29,695	36,2	36,444
605	3,7884	3,7653	3,4474	3,4979	3,1498	3,2988	24,2	23,875	29,1	29,729	36,3	36,505
610	3,7884	3,7641	3,4474	3,4955	3,1436	3,2957	24,2	23,881	29,1	29,762	36,3	36,565
615	3,7884	3,7629	3,4412	3,4932	3,1374	3,2924	24,2	23,886	29,1	29,796	36,4	36,625
620	3,7884	3,7618	3,4412	3,4908	3,1374	3,2891	24,2	23,892	29,2	29,829	36,4	36,685
625	3,7822	3,7606	3,435	3,4885	3,1312	3,2858	24,2	23,898	29,2	29,863	36,4	36,745
630	3,7822	3,7594	3,435	3,4861	3,125	3,2825	24,2	23,904	29,2	29,897	36,5	36,806
635	3,7822	3,7582	3,4288	3,4838	3,125	3,2792	24,2	23,909	29,2	29,93	36,5	36,86
640	3,7822	3,757	3,4288	3,4814	3,1187	3,276	24,2	23,915	29,2	29,964	36,5	36,915
645	3,7822	3,7558	3,4226	3,4791	3,1125	3,2727	24,3	23,921	29,2	29,997	36,6	36,97
650	3,776	3,7546	3,4226	3,4767	3,1125	3,2694	24,2	23,926	29,3	30,031	36,7	37,024
655	3,776	3,7534	3,4164	3,4744	3,1063	3,2661	24,2	23,932	29,3	30,065	36,7	37,079
660	3,776	3,7522	3,4164	3,472	3,1001	3,2628	24,3	23,938	29,2	30,098	36,9	37,134
665	3,7698	3,7511	3,4102	3,4697	3,0939	3,2595	24,3	23,944	29,3	30,132	37	37,188
670	3,7698	3,7499	3,4102	3,4673	3,0939	3,2562	24,3	23,949	29,3	30,166	37,1	37,243
675	3,7698	3,7487	3,404	3,4649	3,0877	3,2523	24,3	23,955	29,4	30,199	37,2	37,298
680	3,7636	3,7475	3,3978	3,4626	3,0815	3,2476	24,3	23,961	29,5	30,233	37,2	37,352
685	3,7636	3,7463	3,3978	3,4602	3,0815	3,243	24,3	23,966	29,5	30,266	37,2	37,407
690	3,7636	3,7451	3,3916	3,4579	3,0691	3,2383	24,3	23,972	29,5	30,3	37,3	37,462
695	3,7636	3,7439	3,3916	3,4555	3,0629	3,2336	24,3	23,978	29,5	30,334	37,2	37,516
700	3,7574	3,7427	3,3916	3,4531	3,0629	3,2289	24,3	23,984	29,6	30,367	37,3	37,571

705	3,7574	3,7415	3,3854	3,4508	3,0567	3,2242	24,3	23,989	29,6	30,401	37,4	37,625
710	3,7574	3,7403	3,3792	3,4484	3,0505	3,2195	24,3	23,995	29,6	30,434	37,4	37,68
715	3,7574	3,7392	3,3792	3,446	3,0443	3,2149	24,3	24,001	29,6	30,468	37,5	37,735
720	3,7574	3,7378	3,373	3,4436	3,0443	3,2102	24,3	24,007	29,6	30,498	37,5	37,789
725	3,7512	3,7364	3,373	3,4412	3,0381	3,2055	24,3	24,012	29,6	30,527	37,5	37,844
730	3,7512	3,7351	3,3668	3,4388	3,0319	3,2007	24,3	24,018	29,7	30,555	37,6	37,899
735	3,7512	3,7337	3,3668	3,4363	3,0257	3,1959	24,3	24,024	29,8	30,584	37,7	37,953
740	3,7512	3,7323	3,3606	3,4339	3,0257	3,1911	24,3	24,029	29,8	30,613	37,7	38,008
745	3,745	3,731	3,3606	3,4314	3,0195	3,1863	24,3	24,035	29,8	30,641	37,8	38,063
750	3,745	3,7296	3,3544	3,4289	3,0133	3,1815	24,3	24,04	29,9	30,67	37,9	38,118
755	3,745	3,7282	3,3482	3,4263	3,0133	3,1766	24,3	24,045	29,9	30,699	38	38,173
760	3,7388	3,7268	3,3482	3,4238	3,0071	3,1718	24,3	24,05	29,9	30,727	38,2	38,228
765	3,7388	3,7255	3,3482	3,4212	3,0009	3,167	24,3	24,054	29,9	30,756	38,1	38,283
770	3,7388	3,7241	3,342	3,4187	3,0009	3,1622	24,3	24,059	29,9	30,785	38,2	38,338
775	3,7388	3,7227	3,3358	3,4162	2,9947	3,1574	24,3	24,064	30	30,813	38,3	38,393
780	3,7326	3,7213	3,3358	3,4136	2,9885	3,1525	24,3	24,068	30,1	30,842	38,4	38,448
785	3,7326	3,72	3,3296	3,4111	2,9823	3,1477	24,3	24,073	30	30,871	38,5	38,503
790	3,7326	3,7186	3,3296	3,4085	2,9761	3,1429	24,3	24,078	30,1	30,9	38,5	38,558
795	3,7326	3,7172	3,3234	3,406	2,9761	3,138	24,3	24,083	30,1	30,928	38,6	38,613
800	3,7326	3,7158	3,3172	3,4035	2,9699	3,1331	24,3	24,087	30,1	30,957	38,6	38,668
805	3,7264	3,7145	3,3172	3,4009	2,9637	3,1283	24,3	24,092	30,1	30,986	38,7	38,723
810	3,7264	3,7131	3,311	3,3984	2,9575	3,1234	24,3	24,097	30,1	31,014	38,7	38,778
815	3,7264	3,7117	3,311	3,3958	2,9575	3,1186	24,3	24,101	30,2	31,043	38,7	38,833
820	3,7264	3,7103	3,311	3,3933	2,9513	3,1137	24,3	24,106	30,2	31,072	38,8	38,889
825	3,7202	3,709	3,3048	3,3907	2,9451	3,1088	24,3	24,111	30,2	31,1	38,8	38,944
830	3,7202	3,7076	3,2986	3,3882	2,9389	3,104	24,3	24,116	30,2	31,129	38,9	38,999
835	3,7202	3,7062	3,2986	3,3856	2,9389	3,0991	24,3	24,12	30,2	31,158	39	39,054
840	3,7202	3,7048	3,2924	3,3831	2,9327	3,0942	24,3	24,125	30,2	31,186	39,1	39,109
845	3,714	3,7035	3,2924	3,3805	2,9265	3,0893	24,3	24,13	30,3	31,215	39,1	39,164
850	3,714	3,7021	3,2862	3,378	2,9203	3,0844	24,3	24,135	30,3	31,244	39,2	39,219
855	3,714	3,7007	3,2862	3,3754	2,9141	3,0795	24,3	24,139	30,3	31,272	39,2	39,274

860	3,714	3,6993	3,28	3,3729	2,9141	3,0746	24,3	24,144	30,3	31,301	39,3	39,329
865	3,7078	3,698	3,28	3,3703	2,9079	3,0697	24,3	24,149	30,3	31,33	39,4	39,39
870	3,7078	3,6966	3,2676	3,3678	2,9017	3,0648	24,3	24,153	30,3	31,358	39,4	39,452
875	3,7078	3,6952	3,2676	3,3652	2,8955	3,0599	24,3	24,158	30,4	31,387	39,4	39,513
880	3,7078	3,6938	3,2614	3,3627	2,8893	3,055	24,3	24,163	30,4	31,416	39,4	39,575
885	3,7016	3,6924	3,2614	3,3601	2,8893	3,0501	24,3	24,168	30,5	31,444	39,6	39,636
890	3,7016	3,6911	3,2552	3,3575	2,8831	3,0452	24,3	24,172	30,5	31,471	39,7	39,698
895	3,7016	3,6897	3,2552	3,355	2,8707	3,0403	24,3	24,177	30,5	31,498	39,7	39,759
900	3,7016	3,6883	3,249	3,3524	2,8645	3,0353	24,3	24,182	30,5	31,526	39,8	39,821
905	3,6954	3,6869	3,2428	3,3498	2,8645	3,0304	24,4	24,187	30,5	31,553	39,9	39,882
910	3,6954	3,6856	3,2428	3,3472	2,8583	3,0254	24,3	24,191	30,6	31,58	40	39,943
915	3,6954	3,6842	3,2366	3,3446	2,8521	3,0191	24,3	24,196	30,6	31,607	40	40,005
920	3,6954	3,6828	3,2366	3,3421	2,8459	3,0126	24,3	24,201	30,6	31,634	40,1	40,066
925	3,6954	3,6814	3,2304	3,3395	2,8397	3,0061	24,4	24,205	30,7	31,661	40,1	40,128
930	3,6954	3,6801	3,2304	3,3369	2,8335	2,9995	24,3	24,21	30,6	31,688	40,2	40,189
935	3,6892	3,6787	3,2242	3,3343	2,8335	2,993	24,4	24,215	30,6	31,715	40,3	40,251
940	3,6892	3,6773	3,2242	3,3317	2,8273	2,9865	24,4	24,22	30,6	31,742	40,3	40,312
945	3,6892	3,6759	3,218	3,3291	2,8211	2,9799	24,4	24,224	30,6	31,769	40,3	40,374
950	3,6892	3,6746	3,218	3,3265	2,8149	2,9734	24,4	24,229	30,6	31,795	40,5	40,435
955	3,683	3,6732	3,2118	3,3239	2,8087	2,9668	24,3	24,234	30,6	31,822	40,6	40,497
960	3,683	3,6718	3,2056	3,3214	2,8025	2,9603	24,4	24,238	30,7	31,848	40,7	40,558
965	3,683	3,6704	3,2056	3,3188	2,7963	2,9538	24,4	24,243	30,7	31,875	40,7	40,62
970	3,683	3,6691	3,2056	3,3162	2,7901	2,9472	24,4	24,248	30,7	31,901	40,8	40,681
975	3,683	3,6677	3,1994	3,3136	2,7901	2,9407	24,4	24,253	30,7	31,928	40,9	40,743
980	3,6768	3,6663	3,1994	3,311	2,7839	2,9341	24,4	24,257	30,8	31,954	41	40,791
985	3,6768	3,6649	3,1932	3,3084	2,7777	2,9276	24,4	24,262	30,8	31,98	41	40,839
990	3,6768	3,6636	3,187	3,3058	2,7715	2,9211	24,4	24,267	30,8	32,006	41,1	40,887
995	3,6768	3,6622	3,187	3,3032	2,7653	2,9145	24,4	24,272	30,8	32,032	41,2	40,935
1000	3,6644	3,6608	3,1808	3,3006	2,7591	2,908	24,4	24,276	30,9	32,058	41,3	40,983
1005	3,6644	3,6594	3,1808	3,2979	2,7529	2,9014	24,4	24,281	30,9	32,084	41,4	41,031
1010	3,6644	3,6581	3,1746	3,2953	2,7529	2,8949	24,4	24,286	31	32,11	41,4	41,079

1015	3,6644	3,6567	3,1746	3,2927	2,7405	2,8884	24,4	24,29	31	32,136	41,5	41,126
1020	3,6644	3,6553	3,1746	3,2901	2,7343	2,8817	24,4	24,295	31	32,161	41,5	41,174
1025	3,6582	3,6539	3,1684	3,2867	2,7343	2,8751	24,4	24,3	31	32,187	41,5	41,222
1030	3,6582	3,6526	3,1684	3,2831	2,7281	2,8684	24,4	24,305	31	32,212	41,6	41,27
1035	3,6582	3,6512	3,1622	3,2795	2,7219	2,8618	24,4	24,309	31	32,238	41,7	41,318
1040	3,6582	3,6498	3,156	3,2759	2,7157	2,8551	24,4	24,314	31	32,263	41,8	41,366
1045	3,6582	3,6484	3,156	3,2723	2,7095	2,8484	24,4	24,319	31,1	32,289	41,9	41,414
1050	3,6582	3,6471	3,1498	3,2687	2,7033	2,8418	24,4	24,324	31,1	32,314	41,9	41,462
1055	3,652	3,6457	3,1498	3,2651	2,6971	2,8351	24,4	24,328	31,2	32,34	42	41,51
1060	3,652	3,6443	3,1436	3,2615	2,6847	2,8284	24,4	24,333	31,2	32,365	42,1	41,558
1065	3,652	3,6429	3,1436	3,2579	2,6723	2,8218	24,5	24,338	31,3	32,39	42,1	41,605
1070	3,652	3,6416	3,1374	3,2543	2,6661	2,8151	24,5	24,342	31,3	32,415	42,2	41,653
1075	3,6458	3,6402	3,1374	3,2507	2,6599	2,8084	24,5	24,347	31,3	32,44	42,2	41,701
1080	3,6458	3,6388	3,1312	3,2471	2,6537	2,8017	24,5	24,351	31,3	32,466	42,3	41,749
1085	3,6458	3,6374	3,1312	3,2435	2,6413	2,7951	24,4	24,355	31,3	32,491	42,4	41,797
1090	3,6458	3,636	3,125	3,2398	2,6351	2,7884	24,5	24,359	31,3	32,515	42,5	41,845
1095	3,6396	3,6347	3,125	3,2362	2,6289	2,7818	24,4	24,363	31,4	32,54	42,5	41,887
1100	3,6458	3,6333	3,1187	3,2326	2,6165	2,7751	24,5	24,367	31,4	32,565	42,7	41,929
1105	3,6396	3,6319	3,1187	3,229	2,6103	2,7498	24,4	24,371	31,5	32,59	42,8	41,97
1110	3,6396	3,6305	3,1125	3,2254	2,5979	2,7231	24,5	24,375	31,5	32,615	43	42,012
1115	3,6396	3,6291	3,1125	3,2218	2,5855	2,6964	24,5	24,378	31,6	32,639	43,1	42,054
1120	3,6396	3,6278	3,1063	3,2182	2,5793	2,6696	24,5	24,382	31,6	32,664	43,1	42,096
1125	3,6334	3,6264	3,1063	3,2145	2,5669	2,6429	24,5	24,386	31,6	32,689	43,2	42,137
1130	3,6334	3,625	3,1001	3,2109	2,5545	2,6161	24,5	24,39	31,6	32,713	43,2	42,179
1135	3,6334	3,6236	3,1001	3,2073	2,5421	2,5894	24,5	24,394	31,6	32,737	43,2	42,221
1140	3,6334	3,6222	3,0939	3,2037	2,5235	2,5655	24,5	24,398	31,6	32,762	43,2	42,263
1145	3,6334	3,6209	3,0939	3,2	2,5111	2,5659	24,5	24,402	31,7	32,786	43,4	42,304
1150	3,6272	3,6195	3,0877	3,1964	2,4987	2,5664	24,5	24,406	31,7	32,81	43,5	42,346
1155	3,6272	3,6181	3,0877	3,1928			24,5	24,41	31,8	32,835		
1160	3,6272	3,6167	3,0815	3,1892			24,5	24,414	31,8	32,859		
1165	3,6272	3,6153	3,0691	3,1855			24,5	24,417	31,8	32,883		

1170	3,621	3,614	3,0691	3,1819			24,5	24,421	31,8	32,907		
1175	3,621	3,6126	3,0629	3,1783			24,5	24,425	31,9	32,931		
1180	3,621	3,6112	3,0629	3,1746			24,5	24,429	31,9	32,955		
1185	3,621	3,6098	3,0567	3,171			24,5	24,433	32	32,978		
1190	3,621	3,6084	3,0567	3,1673			24,5	24,437	32	33,002		
1195	3,621	3,6071	3,0505	3,1637			24,5	24,441	32	33,026		
1200	3,6148	3,6057	3,0443	3,16			24,5	24,445	32	33,05		
1205	3,6148	3,6043	3,0443	3,1563			24,5	24,449	32,1	33,073		
1210	3,6148	3,6029	3,0381	3,1527			24,6	24,453	32,1	33,097		
1215	3,6148	3,6015	3,0381	3,149			24,6	24,457	32,1	33,121		
1220	3,6148	3,6002	3,0319	3,1454			24,6	24,46	32,2	33,145		
1225	3,6086	3,5988	3,0319	3,1417			24,6	24,464	32,2	33,169		
1230	3,6086	3,5974	3,0257	3,1381			24,6	24,468	32,2	33,193		
1235	3,6086	3,596	3,0257	3,1344			24,6	24,472	32,2	33,217		
1240	3,6086	3,5946	3,0195	3,1308			24,6	24,476	32,3	33,241		
1245	3,6024	3,5933	3,0133	3,1271			24,6	24,48	32,3	33,265		
1250	3,6024	3,5919	3,0133	3,1234			24,6	24,484	32,3	33,289		
1255	3,6024	3,5905	3,0071	3,1198			24,6	24,488	32,3	33,313		
1260	3,6024	3,5891	3,0071	3,1161			24,6	24,492	32,5	33,337		
1265	3,6024	3,5877	3,0009	3,1125			24,6	24,496	32,6	33,361		
1270	3,6024	3,5864	3,0009	3,1088			24,6	24,499	32,6	33,384		
1275	3,5962	3,585	2,9947	3,1051			24,6	24,503	32,6	33,408		
1280	3,5962	3,5836	2,9885	3,1015			24,6	24,507	32,7	33,432		
1285	3,5962	3,5822	2,9885	3,0978			24,6	24,511	32,8	33,456		
1290	3,5962	3,5808	2,9823	3,0942			24,6	24,515	32,8	33,48		
1295	3,59	3,5795	2,9823	3,0905			24,6	24,519	32,9	33,503		
1300	3,59	3,5781	2,9761	3,0868			24,6	24,523	32,8	33,527		
1305	3,59	3,5767	2,9699	3,0832			24,6	24,527	32,9	33,551		
1310	3,59	3,5753	2,9699	3,0795			24,6	24,531	32,8	33,575		
1315	3,5838	3,5739	2,9637	3,0758			24,6	24,535	32,8	33,598		
1320	3,5838	3,5726	2,9637	3,0722			24,6	24,538	32,8	33,622		

1325	3,5838	3,5712	2,9575	3,0685			24,6	24,542	32,9	33,646		
1330	3,5838	3,5698	2,9513	3,0648			24,6	24,546	32,9	33,669		
1335	3,5838	3,5684	2,9513	3,0611			24,6	24,55	33	33,693		
1340	3,5776	3,567	2,9451	3,0575			24,6	24,554	33	33,716		
1345	3,5776	3,5657	2,9389	3,0538			24,6	24,558	33	33,74		
1350	3,5776	3,5643	2,9389	3,0501			24,6	24,562	33,1	33,763		
1355	3,5776	3,5629	2,9327	3,0455			24,6	24,566	33,1	33,787		
1360	3,5714	3,5615	2,9265	3,0407			24,6	24,57	33,1	33,81		
1365	3,5714	3,5601	2,9265	3,0359			24,6	24,574	33,2	33,834		
1370	3,5714	3,5588	2,9203	3,0311			24,6	24,577	33,2	33,857		
1375	3,5652	3,5574	2,9203	3,0263			24,7	24,581	33,3	33,881		
1380	3,5652	3,556	2,9141	3,0215			24,6	24,585	33,3	33,905		
1385	3,5652	3,5546	2,9079	3,0167			24,7	24,589	33,3	33,93		
1390	3,5652	3,5532	2,9079	3,0119			24,6	24,593	33,4	33,955		
1395	3,5652	3,5519	2,9017	3,0071			24,6	24,597	33,4	33,98		
1400	3,559	3,5505	2,8955	3,0023			24,7	24,601	33,4	34,005		
1405	3,559	3,5491	2,8955	2,9975			24,7	24,605	33,5	34,03		
1410	3,559	3,5477	2,8893	2,9927			24,6	24,609	33,5	34,056		
1415	3,559	3,5463	2,8831	2,9879			24,6	24,612	33,5	34,081		
1420	3,559	3,545	2,8831	2,9831			24,7	24,616	33,5	34,106		
1425	3,5528	3,5436	2,8707	2,9783			24,7	24,62	33,5	34,132		
1430	3,5528	3,5422	2,8645	2,9735			24,7	24,623	33,6	34,157		
1435	3,5528	3,5408	2,8583	2,9687			24,7	24,627	33,6	34,183		
1440	3,5528	3,5394	2,8521	2,9639			24,7	24,631	33,7	34,208		
1445	3,5466	3,5381	2,8521	2,9591			24,7	24,635	33,8	34,234		
1450	3,5466	3,5367	2,8459	2,9543			24,7	24,638	33,7	34,26		
1455	3,5466	3,5353	2,8459	2,9495			24,7	24,642	33,8	34,286		
1460	3,5466	3,5339	2,8397	2,9447			24,7	24,646	33,8	34,312		
1465	3,5404	3,5325	2,8335	2,9399			24,7	24,649	33,9	34,338		
1470	3,5466	3,5312	2,8273	2,9351			24,7	24,653	33,9	34,364		
1475	3,5404	3,5298	2,8211	2,9304			24,7	24,657	34	34,39		

1480	3,5404	3,5284	2,8149	2,9256			24,7	24,661	33,9	34,416		
1485	3,5404	3,527	2,8149	2,9208			24,6	24,664	34	34,442		
1490	3,5342	3,5256	2,8087	2,916			24,7	24,668	34,1	34,468		
1495	3,5342	3,5242	2,8025	2,9112			24,6	24,672	34	34,495		
1500	3,5342	3,5229	2,7963	2,9064			24,6	24,675	34,2	34,521		
1505	3,528	3,5215	2,7901	2,9015			24,6	24,679	34,3	34,548		
1510	3,528	3,5201	2,7839	2,8967			24,6	24,682	34,3	34,574		
1515	3,528	3,5186	2,7777	2,8918			24,7	24,686	34,4	34,601		
1520	3,528	3,5172	2,7777	2,8869			24,7	24,69	34,4	34,627		
1525	3,528	3,5158	2,7715	2,8821			24,7	24,693	34,5	34,654		
1530	3,5218	3,5143	2,7653	2,8772			24,7	24,697	34,5	34,681		
1535	3,5218	3,5129	2,7529	2,8724			24,7	24,701	34,6	34,708		
1540	3,5218	3,5115	2,7467	2,8675			24,7	24,704	34,6	34,735		
1545	3,5218	3,51	2,7405	2,8627			24,7	24,708	34,7	34,762		
1550	3,5156	3,5086	2,7343	2,8578			24,7	24,712	34,7	34,789		
1555	3,5156	3,5072	2,7281	2,853			24,7	24,715	34,8	34,817		
1560	3,5156	3,5057	2,7219	2,8481			24,7	24,719	34,8	34,844		
1565	3,5156	3,5043	2,7157	2,8433			24,7	24,722	34,9	34,872		
1570	3,5094	3,5029	2,7033	2,8384			24,8	24,726	34,9	34,9		
1575	3,5094	3,5015	2,7033	2,8336			24,8	24,73	34,9	34,927		
1580	3,5094	3,5	2,6909	2,8287			24,8	24,733	35	34,955		
1585	3,5094	3,4986	2,6847	2,8239			24,7	24,737	35,1	34,983		
1590	3,5032	3,4972	2,6723	2,819			24,7	24,74	35	35,011		
1595	3,5032	3,4957	2,6599	2,8142			24,8	24,744	35,1	35,039		
1600	3,5032	3,4943	2,6537	2,8094			24,7	24,747	35,2	35,068		
1605	3,5032	3,4929	2,6413	2,8045			24,8	24,751	35,2	35,096		
1610	3,497	3,4914	2,6351	2,7997			24,8	24,755	35,3	35,124		
1615	3,497	3,49	2,6227	2,7949			24,8	24,758	35,4	35,153		
1620	3,497	3,4886	2,6165	2,7785			24,8	24,762	35,4	35,181		
1625	3,497	3,4871	2,6041	2,7594			24,8	24,765	35,5	35,21		
1630	3,4908	3,4857	2,5917	2,7402			24,8	24,769	35,5	35,238		

1635	3,4908	3,4843	2,5793	2,721			24,8	24,772	35,5	35,267		
1640	3,4908	3,4829	2,5669	2,7018			24,8	24,776	35,6	35,296		
1645	3,4908	3,4814	2,5545	2,6826			24,8	24,779	35,6	35,325		
1650	3,4846	3,48	2,5421	2,6634			24,8	24,783	35,7	35,354		
1655	3,4846	3,4786	2,5235				24,8	24,786	35,7			
1660	3,4846	3,4771	2,5111				24,8	24,79	35,8			
1665	3,4846	3,4757	2,4987				24,8	24,793	35,8			
1670	3,4784	3,4743					24,8	24,797				
1675	3,4784	3,4728					24,8	24,8				
1680	3,4784	3,4714					24,9	24,804				
1685	3,4784	3,47					24,9	24,807				
1690	3,466	3,4685					24,8	24,811				
1695	3,466	3,4671					24,8	24,814				
1700	3,466	3,4657					24,9	24,818				
1705	3,466	3,4642					24,9	24,821				
1710	3,4598	3,4628					24,9	24,825				
1715	3,4598	3,4614					24,9	24,828				
1720	3,4598	3,46					24,8	24,832				
1725	3,4598	3,4585					24,9	24,835				
1730	3,4536	3,4571					24,9	24,839				
1735	3,4536	3,4557					24,8	24,842				
1740	3,4536	3,4542					24,9	24,846				
1745	3,4536	3,4528					24,9	24,849				
1750	3,4474	3,4514					24,9	24,853				
1755	3,4474	3,4499					24,9	24,857				
1760	3,4474	3,4485					24,9	24,86				
1765	3,4474	3,4471					24,9	24,864				
1770	3,4474	3,4456					24,9	24,867				
1775	3,4412	3,4442					24,9	24,871				
1780	3,4412	3,4428					24,9	24,875				
1785	3,4412	3,4413					24,9	24,878				

1790	3,4412	3,4399					24,9	24,882				
1795	3,435	3,4385					24,9	24,886				
1800	3,435	3,4371					24,9	24,889				
1805	3,435	3,4356					25	24,893				
1810	3,435	3,4342					24,9	24,897				
1815	3,4288	3,4328					24,9	24,9				
1820	3,4288	3,4313					24,9	24,904				
1825	3,4288	3,4299					24,9	24,907				
1830	3,4226	3,4285					24,9	24,911				
1835	3,4226	3,427					24,9	24,915				
1840	3,4226	3,4256					24,9	24,918				
1845	3,4226	3,4242					24,9	24,922				
1850	3,4226	3,4227					24,9	24,926				
1855	3,4164	3,4213					24,9	24,929				
1860	3,4164	3,4199					25	24,933				
1865	3,4164	3,4185					24,9	24,937				
1870	3,4164	3,417					25	24,94				
1875	3,4102	3,4156					24,9	24,944				
1880	3,4102	3,4142					24,9	24,948				
1885	3,4102	3,4127					24,9	24,951				
1890	3,4102	3,4113					24,9	24,955				
1895	3,404	3,4099					25	24,959				
1900	3,404	3,4084					24,9	24,962				
1905	3,404	3,407					24,9	24,966				
1910	3,404	3,4056					24,9	24,97				
1915	3,404	3,4041					24,9	24,973				
1920	3,3978	3,4027					24,9	24,977				
1925	3,3978	3,4013					24,9	24,981				
1930	3,3978	3,3999					24,9	24,984				
1935	3,3978	3,3984					24,9	24,988				
1940	3,3916	3,397					25	24,992				

1945	3,3916	3,3956					25	24,995				
1950	3,3916	3,3941					25	24,999				
1955	3,3916	3,3927					25	25,003				
1960	3,3916	3,3913					25	25,006				
1965	3,3916	3,3898					25	25,01				
1970	3,3854	3,3884					25	25,014				
1975	3,3854	3,387					25	25,017				
1980	3,3854	3,3855					25	25,021				
1985	3,3854	3,3841					25,1	25,025				
1990	3,3792	3,3827					25	25,028				
1995	3,3792	3,3813					25	25,032				
2000	3,3792	3,3798					25	25,036				
2005	3,373	3,3784					25	25,039				
2010	3,373	3,377					25	25,043				
2015	3,373	3,3755					25	25,047				
2020	3,373	3,3741					25	25,05				
2025	3,373	3,3727					25,1	25,054				
2030	3,373	3,3712					25	25,058				
2035	3,3668	3,3698					25,1	25,061				
2040	3,3668	3,3684					25,1	25,065				
2045	3,3668	3,3669					25	25,069				
2050	3,3668	3,3655					25,1	25,072				
2055	3,3606	3,3641					25,1	25,076				
2060	3,3606	3,3626					25,1	25,08				
2065	3,3606	3,3606					25,1	25,084				
2070	3,3606	3,3587					25,1	25,088				
2075	3,3606	3,3568					25,1	25,093				
2080	3,3544	3,3549					25,1	25,098				
2085	3,3544	3,3529					25,1	25,102				
2090	3,3544	3,351					25,1	25,107				
2095	3,3544	3,3491					25,1	25,112				

2100	3,3482	3,3472					25,1	25,117				
2105	3,3482	3,3453					25,1	25,122				
2110	3,3482	3,3433					25,1	25,126				
2115	3,3482	3,3414					25,1	25,131				
2120	3,342	3,3395					25,1	25,136				
2125	3,342	3,3376					25,1	25,141				
2130	3,342	3,3357					25,1	25,145				
2135	3,342	3,3337					25,2	25,15				
2140	3,342	3,3318					25,2	25,155				
2145	3,342	3,3299					25,1	25,16				
2150	3,3358	3,328					25,1	25,165				
2155	3,3358	3,326					25,1	25,169				
2160	3,3358	3,3241					25,1	25,174				
2165	3,3358	3,3222					25,1	25,179				
2170	3,3296	3,3203					25,1	25,184				
2175	3,3296	3,3184					25,1	25,188				
2180	3,3296	3,3164					25,2	25,193				
2185	3,3296	3,3145					25,2	25,198				
2190	3,3296	3,3126					25,2	25,203				
2195	3,3234	3,3107					25,2	25,208				
2200	3,3234	3,3087					25,2	25,212				
2205	3,3234	3,3068					25,2	25,217				
2210	3,3234	3,3049					25,2	25,222				
2215	3,3172	3,303					25,2	25,227				
2220	3,3172	3,3011					25,2	25,231				
2225	3,3172	3,2991					25,2	25,236				
2230	3,3172	3,2972					25,2	25,241				
2235	3,311	3,2953					25,2	25,246				
2240	3,311	3,2934					25,2	25,251				
2245	3,311	3,2915					25,2	25,255				
2250	3,311	3,2895					25,2	25,26				

2255	3,311	3,2876					25,2	25,265				
2260	3,311	3,2857					25,2	25,27				
2265	3,3048	3,2838					25,2	25,274				
2270	3,3048	3,2818					25,3	25,279				
2275	3,3048	3,2799					25,3	25,284				
2280	3,3048	3,278					25,3	25,289				
2285	3,2986	3,2761					25,3	25,294				
2290	3,2986	3,2742					25,3	25,298				
2295	3,2986	3,2722					25,3	25,303				
2300	3,2924	3,2703					25,3	25,308				
2305	3,2924	3,2684					25,3	25,313				
2310	3,2924	3,2665					25,3	25,317				
2315	3,2924	3,2645					25,3	25,322				
2320	3,2924	3,2626					25,3	25,327				
2325	3,2924	3,2607					25,3	25,332				
2330	3,2862	3,2588					25,3	25,337				
2335	3,2862	3,2569					25,3	25,341				
2340	3,2862	3,2549					25,3	25,346				
2345	3,28	3,253					25,4	25,351				
2350	3,28	3,2511					25,4	25,356				
2355	3,28	3,2492					25,4	25,36				
2360	3,28	3,2472					25,4	25,365				
2365	3,28	3,2453					25,4	25,37				
2370	3,28	3,2434					25,4	25,375				
2375	3,2676	3,2415					25,4	25,38				
2380	3,2676	3,2395					25,4	25,384				
2385	3,2676	3,2376					25,4	25,389				
2390	3,2676	3,2357					25,4	25,394				
2395	3,2676	3,2337					25,4	25,399				
2400	3,2614	3,2318					25,4	25,404				
2405	3,2614	3,2299					25,4	25,41				

2410	3,2614	3,228					25,4	25,416				
2415	3,2552	3,226					25,4	25,422				
2420	3,2552	3,2241					25,4	25,428				
2425	3,2552	3,2222					25,4	25,434				
2430	3,2552	3,2203					25,4	25,44				
2435	3,249	3,2183					25,4	25,446				
2440	3,249	3,2164					25,4	25,452				
2445	3,249	3,2145					25,4	25,458				
2450	3,249	3,2126					25,4	25,464				
2455	3,2428	3,2106					25,4	25,47				
2460	3,2428	3,2087					25,5	25,476				
2465	3,2428	3,2068					25,4	25,482				
2470	3,2428	3,2049					25,5	25,488				
2475	3,2428	3,2029					25,5	25,494				
2480	3,2428	3,201					25,5	25,499				
2485	3,2366	3,1991					25,5	25,505				
2490	3,2366	3,1972					25,4	25,511				
2495	3,2304	3,1952					25,5	25,517				
2500	3,2304	3,1933					25,5	25,523				
2505	3,2304	3,1914					25,5	25,529				
2510	3,2304	3,1895					25,5	25,535				
2515	3,2304	3,1875					25,4	25,541				
2520	3,2242	3,1856					25,5	25,547				
2525	3,2242	3,1837					25,5	25,553				
2530	3,2242	3,1818					25,5	25,559				
2535	3,2242	3,1798					25,5	25,565				
2540	3,218	3,1779					25,5	25,571				
2545	3,218	3,176					25,5	25,577				
2550	3,218	3,1741					25,5	25,583				
2555	3,218	3,1721					25,6	25,589				
2560	3,2118	3,1702					25,6	25,595				

2565	3,2118	3,1683					25,5	25,601				
2570	3,2118	3,1664					25,6	25,606				
2575	3,2118	3,1644					25,6	25,612				
2580	3,2056	3,1625					25,6	25,618				
2585	3,2056	3,1606					25,6	25,624				
2590	3,2056	3,1586					25,6	25,63				
2595	3,2056	3,1567					25,6	25,636				
2600	3,1994	3,1548					25,6	25,642				
2605	3,1994	3,1529					25,6	25,648				
2610	3,1994	3,1509					25,6	25,654				
2615	3,1932	3,149					25,6	25,66				
2620	3,1932	3,1471					25,6	25,666				
2625	3,1932	3,1452					25,6	25,672				
2630	3,1932	3,1432					25,7	25,678				
2635	3,1932	3,1413					25,6	25,684				
2640	3,187	3,1394					25,6	25,69				
2645	3,187	3,1375					25,7	25,696				
2650	3,187	3,1355					25,7	25,702				
2655	3,1808	3,1336					25,7	25,707				
2660	3,1808	3,1317					25,7	25,713				
2665	3,1808	3,1298					25,7	25,719				
2670	3,1808	3,1278					25,7	25,725				
2675	3,1746	3,1259					25,7	25,731				
2680	3,1746	3,124					25,7	25,737				
2685	3,1746	3,1221					25,7	25,743				
2690	3,1684	3,1201					25,7	25,749				
2695	3,1684	3,1182					25,7	25,755				
2700	3,1684	3,1163					25,8	25,761				
2705	3,1622	3,1143					25,7	25,767				
2710	3,1684	3,1124					25,8	25,773				
2715	3,1622	3,1105					25,8	25,779				

2720	3,1622	3,1081					25,7	25,785				
2725	3,156	3,1056					25,8	25,791				
2730	3,156	3,1031					25,8	25,801				
2735	3,156	3,1007					25,8	25,812				
2740	3,156	3,0982					25,8	25,823				
2745	3,1498	3,0957					25,8	25,833				
2750	3,1498	3,0932					25,8	25,844				
2755	3,1436	3,0908					25,8	25,855				
2760	3,1436	3,0883					25,8	25,866				
2765	3,1436	3,0858					25,8	25,877				
2770	3,1436	3,0834					25,8	25,888				
2775	3,1374	3,0809					25,9	25,899				
2780	3,1374	3,0784					25,9	25,91				
2785	3,1374	3,076					25,9	25,921				
2790	3,1312	3,0735					25,9	25,932				
2795	3,1312	3,071					25,9	25,943				
2800	3,1312	3,0686					25,9	25,954				
2805	3,125	3,0661					25,9	25,965				
2810	3,125	3,0636					25,9	25,975				
2815	3,125	3,0611					25,9	25,986				
2820	3,1187	3,0587					25,9	25,997				
2825	3,1187	3,0562					25,9	26,008				
2830	3,1187	3,0537					26	26,019				
2835	3,1125	3,0513					26	26,03				
2840	3,1125	3,0488					25,9	26,041				
2845	3,1125	3,0463					26	26,052				
2850	3,1063	3,0439					26	26,063				
2855	3,1063	3,0414					26	26,074				
2860	3,1001	3,0389					26	26,085				
2865	3,1001	3,0364					26	26,096				
2870	3,1001	3,034					26	26,107				

2875	3,1001	3,0315					26	26,117				
2880	3,0939	3,029					26,1	26,128				
2885	3,0939	3,0266					26	26,139				
2890	3,0877	3,0241					26,1	26,15				
2895	3,0877	3,0216					26,1	26,161				
2900	3,0877	3,0192					26,1	26,172				
2905	3,0815	3,0167					26,1	26,183				
2910	3,0815	3,0142					26,1	26,194				
2915	3,0815	3,0117					26,1	26,205				
2920	3,0691	3,0093					26,1	26,216				
2925	3,0691	3,0068					26,1	26,227				
2930	3,0629	3,0043					26,1	26,238				
2935	3,0629	3,0019					26,1	26,248				
2940	3,0629	2,9994					26,2	26,259				
2945	3,0567	2,9969					26,2	26,27				
2950	3,0567	2,9945					26,2	26,281				
2955	3,0505	2,992					26,2	26,292				
2960	3,0505	2,9895					26,2	26,303				
2965	3,0443	2,987					26,2	26,314				
2970	3,0443	2,9846					26,2	26,325				
2975	3,0381	2,9821					26,2	26,336				
2980	3,0381	2,9796					26,2	26,347				
2985	3,0319	2,9772					26,3	26,358				
2990	3,0319	2,9747					26,3	26,369				
2995	3,0257	2,9722					26,3	26,38				
3000	3,0257	2,9697					26,3	26,39				
3005	3,0257	2,9673					26,3	26,401				
3010	3,0195	2,9648					26,3	26,412				
3015	3,0133	2,9623					26,3	26,423				
3020	3,0133	2,9598					26,4	26,434				
3025	3,0071	2,9573					26,3	26,445				

3030	3,0071	2,9548					26,4	26,456				
3035	3,0009	2,9523					26,3	26,467				
3040	3,0009	2,9498					26,4	26,478				
3045	2,9947	2,9474					26,4	26,489				
3050	2,9885	2,9449					26,4	26,5				
3055	2,9885	2,9424					26,5	26,511				
3060	2,9885	2,9399					26,5	26,529				
3065	2,9823	2,9375					26,5	26,55				
3070	2,9761	2,935					26,5	26,57				
3075	2,9761	2,9326					26,5	26,59				
3080	2,9699	2,9301					26,5	26,61				
3085	2,9637	2,9277					26,5	26,631				
3090	2,9637	2,9252					26,5	26,651				
3095	2,9575	2,9227					26,6	26,671				
3100	2,9513	2,9203					26,6	26,692				
3105	2,9513	2,9178					26,6	26,712				
3110	2,9451	2,9154					26,6	26,732				
3115	2,9389	2,9129					26,6	26,752				
3120	2,9327	2,9105					26,6	26,773				
3125	2,9327	2,908					26,7	26,793				
3130	2,9265	2,9056					26,7	26,813				
3135	2,9203	2,9031					26,7	26,834				
3140	2,9141	2,9007					26,7	26,854				
3145	2,9079	2,8982					26,7	26,874				
3150	2,9079	2,8957					26,7	26,895				
3155	2,9017	2,8933					26,8	26,915				
3160	2,8955	2,8908					26,8	26,935				
3165	2,8893	2,8884					26,8	26,955				
3170	2,8831	2,8859					26,8	26,976				
3175	2,8707	2,8835					26,8	26,996				
3180	2,8645	2,881					26,8	27,016				

3185	2,8583	2,8786					26,8	27,037				
3190	2,8521	2,8761					26,9	27,057				
3195	2,8459	2,8736					26,9	27,077				
3200	2,8397	2,8712					26,9	27,097				
3205	2,8335	2,8687					26,9	27,118				
3210	2,8273	2,8663					26,9	27,138				
3215	2,8211	2,8638					27	27,158				
3220	2,8149	2,8614					27	27,179				
3225	2,8025	2,8589					27	27,199				
3230	2,7963	2,8565					27	27,219				
3235	2,7901	2,854					27	27,239				
3240	2,7839	2,8516					27,1	27,26				
3245	2,7777	2,8491					27	27,28				
3250	2,7653	2,8399					27	27,3				
3255	2,7591	2,8303					27,1	27,321				
3260	2,7467	2,8206					27,1	27,341				
3265	2,7405	2,811					27,2	27,361				
3270	2,7281	2,8014					27,2	27,381				
3275	2,7219	2,7917					27,2	27,402				
3280	2,7157	2,7821					27,2	27,422				
3285	2,7033	2,7725					27,2	27,442				
3290	2,6909	2,7629					27,3	27,463				
3295	2,6847	2,7532					27,3	27,483				
3300	2,6661	2,7436					27,3	27,503				
3305	2,6537	2,7102					27,4	27,799				
3310	2,6475	2,7004					27,4	27,803				
3315	2,6351	2,6907					27,4	27,806				
3320	2,6227	2,6809					27,4	27,81				
3325	2,6103	2,6712					27,5	27,813				
3330	2,5979	2,6615					27,5	27,817				
3335	2,5855	2,6517					27,5	27,82				

3340	2,5731	2,642					27,6	27,823				
	2,5607						27,6					
	2,5483						27,6					
	2,5359						27,7					
	2,5235						27,7					
	2,5111						27,7					
	2,4987											

ÖZGEÇMİŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- Yüksek Lisans: 2021, İstanbul Gedik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü – 3.88/4
- Lisans: 2017, İstanbul Aydın Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü (%100 İngilizce – Tam Burslu) – 3.10/4
- Ön Lisans: 2014, Hacettepe Üniversitesi, Polatlı MYO, Elektronik Teknolojisi Bölümü 3.77/4
- Lise: 2009, NODET Üstün Zekalı Okulu, Matematik-Fizik Fen Bölümü, 3.05/4

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Birikim Pilleri Ltd. Şti.: ARGE Müdürü 2019-Halen
- GraphenePi: Ar-Ge ve Proje Sorumlusu 2018-2019
- İstanbul Medipol Üniversitesi: TA-Teacher Assistant ve Tam YL Bursu 2017-2018
- İhsan Doğramacı Üstün Başarı Ödülü: Hacettepe Üniversitesi 2015
- Bölüm ve Fakülte Birinciliği Ödülü: Hacettepe Üniversitesi 2014
- Ülke Birinciliği (İran): NODET KHORD Mühendislik Yarışması 2007

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Joula, M.**, Dilibal, S., & Owusu-Danquah, J. (2021, March). Smart Adaptronic Thermal Management System Designs for The Li-ion Battery Packs. In *2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)* (pp. 1-6). IEEE.
- **Joula, M.**, Mafratoğlu, G., Alipour, M., & Dilibal, S. Hybrid Battery Management System with NiTi SMA and Phase Change Material (PCM) for Li-Ion Batteries: *Energies: Electrochemical Energy Storage: Current and Future Challenges* Under Review

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Joula, M.**, Rafiei, V., & Karamzadeh, S. (2018). High gain UWB bow-tie antenna design for ground penetrating radar application. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(10), 2425-2429.
- **Joula, M.** (2021). Türk Patent Enstitüsü, Hafif Elektrikli Araçlar İçin Modüler Batarya Yönetim Sistemi. Patent numarası: 2021/007338 - *Pending*
- **Joula, M.**, Mafratoğlu, G., (2021). Türk Patent Enstitüsü, Li-ion Piller için Birincil Koruma Devresi. Patent Numarası: 2021/007336 - *Pending*
- Mafratoğlu, G., **Joula, M.**, (2021). Türk Patent Enstitüsü, Li-ion Bataryalar için Analog Batarya Yönetim Cihazı. Patent numarası: 2021/007327 - *Pending*